Ueber den Einfluss von mechanischen und magnetischen Erschütterungen auf den magnetischen Zustand ferromagnetischer Körper.

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde

der

hohen philosophischen Fakultät

der

Universität Rostock.

ACAD
LIBRARY
BIBL.

Vorgelegt von

Friedrich Moeller

aus Rostock.

Herrmann Hadorff & Co., Berlin.
1912.

Ueber den Einfluss von mechanischen und magnetischen Erschütterungen auf den magnetischen Zustand ferromagnetischer Körper.

Referent: Prof. Dr. **Heydweiller.**

Inhaltsverzeichnis.

Seite

Einleitung 5

Erster Abschnitt. Mechanische Erschütterungen 11

a) Literatur 11

b) Longitudinal-Erschütterungen 13

c) Transversal-Erschütterungen 16

1. Versuche an weichem Eisen 18

2. Versuche an Stahl 22

3. Versuche an Nickel 22

Zweiter Abschnitt. Magnetische Erschütterungen 26

a) Literatur 26

b) Longitudinal-Erschütterungen 29

c) Transversal-Erschütterungen 31

1. Versuche an weichem Eisen 31

a) Mit unterbrochenem Gleichstrom 31

b) Mit Wechselströmen 37

2. Versuche an Stahl 45

a) Mit unterbrochenem Gleichstrom 45

b) Mit Wechselströmen 46

3. Versuche an Nickeldraht..... 48

Schluss. Ergebnisse 54

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41553620_0069

Einleitung.

Die Hypothese von der Lageveränderung molekülarer Magnete gegeneinander, wie sie in der Theorie des Magnetismus angenommen wird, gründet sich zum grossen Teil auf die Wirkungen, die mechanische Kräfte auf den magnetischen Zustand eines magnetisierten Körpers ausüben. Es sind daher seit einer Reihe von Jahren von vielen Forschern die Beziehungen zwischen dem Magnetismus und mechanischen Kräften untersucht worden. So haben Thomson, Warburg, G. Wiedemann, Villari, Ewing, Fromme, M. Cantone, Heydweiller, Nagaoka u. a. sich mit diesen Erscheinungen beschäftigt. Jedoch erstreckten sich ihre Untersuchungen mehr auf den Einfluss, den dauernde mechanische Einwirkungen, wie z. B. Dehnung oder Torsion, auf magnetische Körper ausüben, und nur ein kleinerer Teil von ihnen, wie Wiedemann, Cantone, Fromme, Warburg und Ewing beschäftigen sich auch mit dem Einfluss solcher mechanischen Kräfte, die man „Erschütterungen" nennt. Die genannten Forscher untersuchen zum Teil, wie z. B. Fromme, die Aenderung des remanenten Magnetismus, also des permanenten Moments, infolge der Erschütterungen, zum Teil, wie z. B. Warburg und Ewing, suchen sie auch den Einfluss derselben auf das temporäre Moment festzustellen. Die Literatur ist weiter unten genauer angegeben!

Es ist allen Forschern, die auf dem genannten Gebiet gearbeitet haben, gemeinsam, dass sie das behandelte Material nur einigen wenigen aufeinanderfolgenden Erschütterungen aussetzen. In der vorliegenden Arbeit ist der Versuch gemacht worden, das Verhalten des temporären und permanenten Moments gegen oft wiederholte periodische mechanische Störungen darzustellen. Von grossem Interesse ist dabei die Frage nach der Abhängigkeit der Wirkung von der Grösse der Störungen. Es wurden daher schwächere und stärkere Erschütterungen angewandt und die Untersuchungen für beide gesondert durchgeführt. Die Versuche erstreckten sich auf den ganzen Magnetisierungszyklus mit Einschluss der jungfräulichen Kurve.

Die Aenderung des Magnetismus bedeutet zugleich eine Aenderung der Permeabilität des Materials. Es ist von Wichtigkeit, die Abhängigkeit derselben von den Erschütterungen kennen zu lernen. Zu diesem Zwecke wurde für erschütterungsfreie- und Erschütterungs-Magnetisierungskurven die Permeabilität als Funktion der Feldstärke aufgetragen. Besondere Sorgfalt wurde auch auf die Herstellung von sogenannten Zeitkurven verwandt. Die Grösse der Aenderung des Magnetismus ist offenbar nicht nur abhängig von der Stärke der Erschütterungen, sondern auch von ihrer Anzahl oder, wenn wir eine gewisse pro Sekunde gleichbleibende Anzahl annehmen, von ihrer Dauer. Die Abhängigkeit von ihr zeigen die Zeitkurven.

In der Wirkung auf den Magnetismus den mechanischen Kräften sehr ähnlich sind die magnetischen Kräfte, zumal diejenigen, welche transversal zur ursprünglichen Magnetisierung gerichtet sind, wie die Arbeiten von Wiedemann, Villari, W. v. Siemens, Fromme und anderen Forschern bewiesen haben. Sie stellten transversale Felder dadurch her, dass sie galvanische Ströme durch den Versuchsdraht leiteten. Jedoch beschränken sich auch hier die Untersuchungen nur

auf Teile der Magnetisierungskurve. Wir können diese magnetischen Kräfte in magnetische Erschütterungen verwandeln, wenn wir die zirkularen Felder durch Oeffnen und Schliessen des Stromes abwechselnd zum Verschwinden bringen und wiederherstellen oder indem wir die Richtung der Felder durch Wechselströme umkehren. Dies Verfahren wandten die italienischen Forscher Gerosa und Finzi an, indem sie zugleich ihre Versuche auf den ganzen Zyklus ausdehnten. Es gelang ihnen auf diese Weise, den ganzen remanenten Magnetismus zum Verschwinden zu bringen. Die Resultate dieser Arbeiten sind hier nochmals geprüft und analog den bei den mechanischen Erschütterungen angestellten Versuchen erweitert worden.

Den Anlass zu der vorliegenden, von Herrn Professor Heydweiller angeregten Arbeit gab nicht, wie vielleicht naheliegend ist, ein Studium der oben erwähnten Werke, sondern sie wurde von einem anderen Gesichtspunkt aus begonnen. Herr Hübers veröffentlichte in seiner Dissertation[1]) sehr interessante Untersuchungen über elastische Eigenschaften einiger Metalle bei Dehnung und Biegung.

Ein Hauptresultat war das folgende:

Belastet man einen Draht aus einem beliebigen Metall, z. B. Eisen, mit einem beliebigen Gewicht Q, das die Tragfähigkeit des Drahtes nicht übersteigt, so dehnt sich der Draht um eine gewisse Strecke. Die Grenze der Dehnung mit der Zeit ist sehr bald erreicht. Nach diesem Zeitpunkt ist eine weitere Dehnung des Drahtes nicht zu bemerken. Wird nun der Draht unter Beibehaltung des festen Gewichtes Q periodischen Belastungsschwankungen ausgesetzt, das heisst, belasten und entlasten wir den Draht abwechselnd um ein kleines Zusatzgewicht von der Grössenordnung von ungefähr $0{,}05\ Q$ — ein Gewicht, das an und für sich eine ausserordentlich geringe Mehrdehnung des Drahtes hervorrufen

[1]) G. Hübers, Inaugural-Dissertation, Rostock 1909.

würde —, so tritt augenblicklich eine ganz ausserordentliche Dehnung des Drahtes ein. Es sei mir gestattet, hier ein Zitat aus Herrn Hübers Arbeit zu geben:

> „Bei Belastung auf Zug tritt während einer Unterbrechung der periodischen Belastungsschwankungen eine merkbare Längenänderung nicht ein. Beim Wiedereinsetzen der Belastungsschwankungen erfolgt sofort eine verhältnismässig starke Ausdehnung. Diese Erscheinung wurde nach jeder neuen Ruhepause aufs neue bemerkt, so dass ein Endwert der Verlängerung auch nach wochenlangen Belastungsschwankungen nicht erreicht wurde."

Wegen der weitgehenden Analogie, die elastische und magnetische Erscheinungen zeigen — und von diesem Gesichtspunkt aus wurde die Arbeit begonnen —, lag es nahe, ähnliche Beziehungen auf dem Gebiet des Magnetismus zu vermuten. Lassen wir die Anordnung von Hübers ungeändert und magnetisieren den Draht in Richtung der Aufhängung, also longitudinal, so können wir die Belastungsschwankungen als longitudinale mechanische Erschütterungen ansehen, die einen analogen Einfluss auf den Magnetismus wie auf die Elastizität des Drahtes haben könnten. Das Resultat, welches wir vermuten, würde lauten: Hat die magnetische Induktion im Felde H, das noch nicht den Sättigungszustand des Eisens hervorruft, unter Einfluss des festen Gewichtes Q nach Ablauf einer gewissen Zeit einen Endwert erreicht, der sich nach diesem Zeitpunkt nicht mehr ändert, so tritt bei Einsetzen der Erschütterungen sofort eine bedeutende Erhöhung der Induktion im Eisen ein, die sich asymptotisch einer Grenze nähert.

Ob diese Hypothese der Wahrheit entspricht oder nicht, mag erst weiter unten erörtert werden. Einen gleichen Einfluss wie für longitudinale Erschütterungen dürfen wir für transversale Erschütterungen vermuten.

Wir stellen sie dadurch her, dass wir durch Klopfen den Draht in eine kurzdauernde Schwingung vertikal zur Magnetisierungsrichtung versetzen. Die Versuche für diese beiden Erschütterungsarten sind im ersten Abschnitt unter den Namen mechanische Erschütterungen zusammengestellt.

Der Versuch des Herrn Hübers erlaubt noch eine andere Uebertragung in das magnetische Gebiet. Wir können gewissermassen den Versuch einfach ins magnetische Gebiet übersetzen, indem wir den Draht einem festen Felde H aussetzen und dieses Feld um einen Bruchteil vermehren oder vermindern. Wir erzeugen dadurch magnetische longitudinale Erschütterungen. Wir könnten von ihnen eine ähnliche Wirkung wie von den analogen mechanischen Erschütterungen erwarten. Anstatt den Draht longitudinal magnetisch zu erschüttern, können wir ihn auch transversal magnetisch dadurch erschüttern, dass wir Felder transversal zur ursprünglichen Magnetisierungsrichtung herstellen und zum Verschwinden bringen. Das ist unschwer dadurch zu erreichen, dass wir einen elektrischen Strom durch den Draht schicken. Dieser erzeugt ein zirkulares Feld, das senkrecht zur eigentlichen Magnetisierung liegt. Diese Untersuchungen sind im zweiten Abschnitt zusammengefasst.

Allgemeines über Material, Methoden usw.

Zur Untersuchung gelangten die ferromagnetischen Medien: Eisen, Stahl und Nickel, alle in Drahtform von verschiedener Stärke, die bei den einzelnen Versuchen angegeben ist. In Anwendung kam nur die magnetometrische Methode. Die Magnetisierung der Drähte wurde erreicht durch eine vom Strom durchflossene Spule, in deren Achse sie sich befand. Der Einfluss der Spule auf das Magnetometer wurde kompensiert. Die Entfernung des Magnetometers von der Spule schwankte zwischen 20 bis 60 cm, je nach der Stärke und Art des Drahtes, dessen magnetische Wirksamkeit, je nachdem Eisen, Stahl oder

Nickel in der Spule war, ausserordentliche Unterschiede zeigte. Aus demselben Grunde betrug der Abstand des Magnetometers von der Skala von 180 cm bei grösseren Ablenkungen bis zu 250 cm bei kleineren Ablenkungen der Nadel. Eisen- und Nickeldraht wurden vor der Untersuchung ausgeglüht, der zur Verwendung gelangte Stahl = Klaviersaitendraht blieb unverändert. Die Magnetisierungsspule wurde wandfest vertikal aufgehängt, so dass ihre Lage bei sämtlichen Versuchen dieselbe blieb. Der durch sie geführte Versuchsdraht wurde oben an einem Haken in der Wand befestigt, sein unteres Ende so in ein Stativ eingelegt, dass er sich während der Dauer eines Versuchs nicht seitlich verschieben konnte. Leider waren einige Beobachtungsfehler unvermeidlich. Die Schwankungen des Magnetometers auf der Skala infolge von Erdströmen betrugen bis zu 4 mm, so dass kleinere Ausschläge nicht mit Sicherheit festgestellt werden konnten. Der Widerstand der Spule betrug 6,5 Ohm. Die Spule bestand aus 10 Lagen, jede Lage aus 242 Windungen. Sie hatte eine Länge von 41,5 cm und eine lichte Weite von 0,9 cm. Die Dicke ihres Kupferdrahtes betrug 0,8 mm. Auf 1 cm Länge der Spule kamen für jede Lage ungefähr 6, im ganzen also 60 Windungen. Das Feld im Innern der Spule ist in dem homogenen Teil $= 4\,\pi\,n\,i$ absolute elektromagnetische Einheiten, wo n die Gesamtzahl der Windungen pro cm Spulenlänge und i der Strom in absoluten Einheiten ist. Daraus berechnet sich die Feldstärke im Solenoid zu ungefähr 75 *C. G. S.* Einheiten für $\frac{1}{10}$ *C. G. S.* Stromeinheiten $= 1$ Ampere. Bei allen Versuchen wurde die Anfangsmagnetisierung willkürlich $= 0$ angenommen. Da jedoch der Versuchsdraht vertikal aufgehängt war, wie schon erwähnt wurde, so stand er unter dem Einfluss der Vertikalkomponente des Erdfeldes, die nicht kompensiert wurde. Die Anfangsmagnetisierung war also nicht gleich null,

woraus sich bei allen Kurven eine Unsymmetrie gegen die Abszissenachse ergibt. Die erforderliche Magnetisierungsstromstärke betrug bis 2 Ampere. Sie wurde mit einem Siemens-Präzisionsamperemeter gemessen. Die benutzten Spannungen waren 4 bis 10 Volt. Zur Aufnahme der zyklischen Magnetisierungskurven wurde ein Stufenwiderstand aus 5 Stufen benutzt, so dass also im ganzen 20 Punkte der Kurve bestimmt werden konnten. Die Grösse der einzelnen Stufen ist später angegeben. Die Versuche wurden auf folgende Weise ausgeführt: Es wurde für jeden Draht erst eine erschütterungsfreie, das heisst also eine natürliche Hysteresiskurve hergestellt. Die betreffenden Ablesungen sind in den Tabellen unter Spalte 3 angegeben. Die Anordnung wurde völlig ungeändert gelassen und an demselben Draht nochmals eine vollständige Kurve, diesmal unter Einwirkung der Erschütterungen, aufgenommen. Die Ablesungen für diese Kurve sind in den Tabellen unter Spalte 4 angegeben. In Spalte 1 sind die Stufenwiderstände, in 2 die zugehörigen Stromstärken eingeschrieben. In dieser Weise sind, wenn nicht ausdrücklich anders bemerkt ist, sämtliche Tabellen der Arbeit angeordnet. Die Schaltungen sind, da sie für jeden Abschnitt anders ausfielen, erst beim zugehörigen Kapitel beschrieben.

Erster Abschnitt.

Mechanische Erschütterungen.

a) Literatur.

Der Einfluss longitudinaler Erschütterungen ist sehr selten Gegenstand der Forschung gewesen. Soweit mir bekannt, hat nur Warburg eine Arbeit darüber veröffentlicht: „Ueber den Einfluss tönender Schwingungen auf den

Magnetismus des Eisens."[1]) Er stellte die Erschütterungen durch Reiben des Eisenstabes mit einem harzigen Lederlappen her, so dass der Stab in tönende Longitudinalschwingungen (ungefähr 1300 pro Sekunde) geriet. Warburg zog nur einzelne temporäre Momente in den Bereich seiner Untersuchungen und fand dabei, dass „trotz der Kleinheit der Elongationen und trotz der Schnelligkeit der Schwingungen mit den periodischen Dichtigkeitswechseln sehr merkliche Oszillationen des magnetischen Moments verbunden sind".

Alle übrigen Forscher, die sich mit dem Einfluss mechanischer Erschütterungen auf den Magnetismus beschäftigten, verstehen darunter nur den Einfluss transversaler Erschütterungen. Hier sind eine ganze Reihe von Untersuchungen zu nennen. Ein Versuch über das Verhalten des Stahls gegen derartige Erschütterungen findet sich schon 1857 in einer Arbeit von G. Wiedemann: „Ueber den Magnetismus von Stahlstäben".[2]) Ueber das Resultat seiner Experimente schrieb er: „Wurde ein Stahlstab, während er in der Spirale dem Einfluss des magnetisierenden Stromes ausgesetzt war, durch Schläge erschüttert, so wuchs dadurch das nach dem Aufhören der Einwirkung des Stromes in ihm zurückbleibende Residuum. Erschütterte man dagegen den Stab, nachdem der magnetisierende Strom aufgehört hatte zu wirken, so verminderte sich sein Magnetismus". Eine Erweiterung der Versuche gab zunächst Fromme, indem er auch das temporäre Moment des Stahls in den Bereich seiner Betrachtungen zog.[3]) Während vorige Versuche in den Gang anderer Abhandlungen eingeflochten sind, also gewissermassen nur Nebenbetrachtungen darstellen, finden wir in der Folge die Forscher mit systematischen Untersuchungen über diese Fragen beschäftigt. So hat Fromme in einer Veröffentlichung „Ueber die Wirkung von Erschütterung

[1]) Warburg, Pogg. Annalen 139, 499; 1870.
[2]) G. Wiedemann, Pogg. Annalen 100, 241; 1857.
[3]) Fromme, Wied. Annalen 4, 98; 1878.

und Erwärmung auf den Magnetismus“ [1]) den Einfluss von Erschütterungen auf den remanenten Magnetismus zum Gegenstand seiner Betrachtungen gemacht, indem er die permänenten Momente von Eisenstäben feststellte, dann die Stäbe dadurch erschütterte, dass er sie horizontal auf einen Tisch fallen liess und dann das zurückgebliebene Moment mass. Er wandte ferner verschiedene Arten von Erschütterungen an, die er in harte und weiche unterschied, und fand, dass sie auf die Aenderung des Magnetismus von verschiedenem Einfluss waren.

Weiter als Fromme ging J. A. Ewing,[2]) der auch die jungfräuliche Kurve untersuchte und besonders die Erhöhung der Permeabililtät infolge der Erschütterungen hervorhob. Seine Versuche, soweit sie sich auf den remanenten Magnetismus beziehen, zeigen dasselbe Resultat wie diejenigen von Fromme, nämlich eine Erniedrigung der Hysteresis. Eine zusammenhängende Darstellung aller bekannten Erscheinungen auf diesem Gebiet geben sowohl G. Wiedemann[3]) in seiner Lehre von der Elektrizität als Ewing,[4]) so dass sich eine weitere Angabe der Literatur hier erübrigt.

b) Longitudinal-Erschütterungen.

Wie schon erwähnt, war die Magnetisierungsspule wandfest vertikal aufgehängt, der Versuchsdraht mit seinem oberen Ende ebenfalls an der Wand befestigt und durch die Spule hindurchgeführt. Die Schaltung war so einfach, dass eine Beschreibung genügt. Zur Aufnahme der Hysteresis-

---

[1]) **Fromme**, Wied. Annalen **61**, 55; 1897.

[2]) J. A. Ewing, Magnetische Induktion, deutsche Uebersetzung 1892; p. 110—115.

[3]) G. Wiedemann, die Lehre von der Elektrizität 1895, Bd. III; p. 733—740.

[4]) Siehe Anmerk. [2]).

kurve war, wie schon früher bemerkt, ein Stufenwiderstand nötig, der im Kreis der Magnetisierungsspule lag und aus 5 Stufen, 125 — 80 — 43,5 — 18 — 0 Ohm, bestand. Der Einfluss der Spule auf das Magnetometer war durch eine andere Spule kompensiert, die hinter der Magnetisierungsspule in den Stromkreis eingeschaltet war. Zur Aufnahme der Hysteresiskurven war ausserdem noch ein Kommutator nötig, um den Strom in der Magnetisierungsspule umkehren zu können. Der Strom der Kompensationsspule wurde durch denselben Kommutator ebenfalls umgekehrt. Vor dem Kommutator lag zur Messung der Stromstärke das Siemensche Präzisionsamperemeter. Die Belastungsschwankungen wurden folgendermassen erreicht: An dem Gewicht, das am Versuchsdraht aufgehängt war, wurde ein Eisenkern befestigt, der bis zur Hälfte in eine stromdurchflossene Spule tauchte. Diese übte eine gewisse Zugkraft auf den Eisenkern aus, die sich auf den Versuchsdraht übertrug. Die Zugkraft der Spule wurde vorher für verschiedene in einfachen Verhältnissen zueinander stehende Stromstärken an einer Wage festgestellt. Bei abwechselndem Oeffnen und Schliessen des Stromes durch einen Unterbrecher wurde der Eisenkern periodisch eingezogen und wieder losgelassen. Die Stromstärke konnte durch einen veränderlichen Widerstand geregelt werden. — — Die Spannung für den Strom der Magnetisierungsspule betrug 4 Volt. Es wurde dadurch eine maximale Stromstärke von 0,497 Amp. erreicht, und der Höchstwert des magnetischen Feldes in der Spule stieg auf ungefähr 37,5 *C. G. S.* Einheiten. Die Anzahl der Erschütterungen betrug anfangs 70 in der Minute, wurde aber im Laufe der Versuche bis zu 140 in der Minute gesteigert. Die Versuche, die an weichem Eisendraht ausgeführt wurden, verliefen sämtlich negativ, trotzdem die Kraft der Belastungsschwankungen bis zu 15 % des festen Gewichtes gesteigert wurde. Versuche an Stahl und Nickel wurden nicht ausgeführt, da aus den vorhergehenden

Versuchen an weichem Eisen mit Sicherheit zu schliessen war, dass sie ebenfalls negativ verlaufen wären. Eine Versuchsreihe, die an Eisendraht von 1,8 mm Dicke bei 15 % Belastungsschwankungen aufgenommen wurde, ist in Tabelle 1 mitgeteilt. Die Anordnung der Tabelle sei nochmals kurz angegeben: In Spalte 1 stehen die Stufenwiderstände, in Spalte 2 die zugehörigen Magnetisierungsstromstärken, in Spalte 3 sind die Ablesungen für die natürliche Hysteresiskurve, in 4 die Ablesungen der Hysteresiskurve unter Einwirkung der Erschütterungen angegeben. Für jede Stufe wurden die Belastungsschwankungen 7 Minuten lang fortgesetzt, dann wurden sie unterbrochen, um die Ablesung vorzunehmen. Darauf wurde die folgende Stufe eingeschaltet und die Erschütterungen wieder aufgenommen usw. Die jungfräuliche Kurve ist nicht registriert worden. Die Tabelle zeigt, dass eine Analogie zu den entsprechenden Versuchen des Herrn Hübers hier nicht vorhanden ist. Mit den erwähnten Versuchen von Warburg scheinen diese Resultate für den oberflächlichen Beobachter in Widerspruch zu stehen. Bei genauerer Betrachtung jedoch zerfällt der Widerspruch. Warburg benutzte bei seinen Untersuchungen die ballistische Methode, schaltete aber in den Kreis der Induktionsspirale kein Galvanometer, sondern ein Dynamometer ein. Es entstanden nämlich in der Induktionsspirale Wechselströme, auf die ein gewöhnliches Galvanometer nicht reagiert. „Es ist daraus zu schliessen, schreibt Warburg, dass die Wirkung auf das Dynamometer abwechselnd entgegengerichteten Strömen von gleicher Stärke zuzuschreiben ist, welche abwechselnd entgegengerichtete, gleiche Aenderungen des Magnetismus anzeigen.“ [1]) Warburgs Versuche zeigen, dass wahrscheinlich nur temporäre Aenderungen des Magnetismus auftreten, und dass nach Aufhören der Erschütterungen sich der ursprüngliche magnetische Zu-

[1]) Warburg, Pogg. Annalen 139, 501; 1870.

stand wieder herstellt. Diese Resultate befinden sich demnach in guter Uebereinstimmung mit den vorliegenden Untersuchungen.

c) Transversal-Erschütterungen.

Die Schaltung für die Magnetisierungsspule ist dieselbe wie in b. Die Transversalerschütterungen wurden folgendermassen hergestellt: Um den Draht von den störenden Einflüssen fernzuhalten, die sich nicht vermeiden lassen, wenn man ihn zwecks Vornahme der Erschütterungen aus der Spule herauszieht, wurde er in der Spule gelassen, und die Erschütterungen durch Klopfen gegen ihn bewirkt. Die Einrichtung des Klopfwerkes sei kurz beschrieben: Durch einen Unterbrecher wird ein Elektromagnet periodisch erregt und zieht einen Anker, den sogenannten Klopfer an, der in einem Zapfen drehbar gelagert ist. Eine Feder zieht den Klopfer wieder in die ursprüngliche Lage zurück, sobald der Magnet ihn loslässt. Der Klopfer schlägt bei der Anziehung nicht auf den Magneten, sondern auf das eine Ende eines Messingstabes, der durch zwei Lager in horizontaler Lage gehalten wird und mit seinem anderen Ende gegen den Versuchsdraht anliegt, der durch ein Widerlager am Ausweichen gehindert wird. Auf diese Weise gibt der Hammer den grössten Teil seiner Energie auf den Draht ab. Da der (Hufeisen-)Magnet eine recht bedeutende Stärke besass, so musste er in genügender Entfernung vom Magnetometer aufgestellt werden, um keine Ablesungsfehler hervorzurufen. Aus diesem Grunde besass die Messingstange eine Länge von 90 cm. Eine Störung durch den Elektromagneten wurde dadurch gänzlich vermieden. Die Periode des Unterbrechers war 50 in der Minute, so dass der Draht also 50 mal in der Minute erschüttert wurde. Durch einen Widerstand, der in den Stromkreis des Magneten eingeschaltet war, wurde die

Kraft des Hammers geregelt, dessen Stosskraft für zwei verschiedene Stromstärken mittels eines ballistischen Pendels bestimmt wurde. Die Bestimmung kann keinen Anspruch auf grosse Genauigkeit machen, sondern die bestimmten Kräfte sind wahrscheinlich mit einem Fehler zu klein, dessen Grösse vielleicht 20% der berechneten Kraft betragen mag. Die Kraft des Klopfers wurde auf ein Gewicht Q übertragen, das an einem Faden von der Länge l aufgehängt war. Infolge des Stosses schlug das Pendel dann bis zu einem Ausschlagswinkel α aus, der um so grösser war, je grösser die Kraft war, die der Klopfer besass. Hat das Pendel den grössten Ausschlag α erreicht, so besitzt es eine gewisse potentielle Energie, die der ihm durch den Stoss erteilten kinetischen Energie entspricht. Die dem Pendel erteilte Geschwindigkeit ist $\sqrt{2\,g\,h}$, wo h die Hubhöhe des Pendels ist. Es ist dann die Stosskraft des Pendels $= m\sqrt{2\,g\,h}$ gr. $\frac{cm}{sek.}$. Die Masse m, Pendellänge und Ausschlagwinkel α wurden gemessen.

Die Methode leidet an dem Fehler, dass sich die Kraft des Hammers nie völlig auf das Pendel überträgt, sondern dass der Hammer immer eine gewisse Energie behält, die durch Aufschlagen auf den anziehenden Magneten vernichtet wird. Dies wird ja bei den Versuchen mit Hilfe der Messingstange vermieden, und die berechnete Kraft muss daher stets zu klein ausfallen. Der Ausschlagwinkel α lässt sich ebenfalls nicht genau bestimmen, doch fällt wohl dieser Fehler weit weniger ins Gewicht. Immerhin ist jedoch ein Vergleich der verschiedenen Stosskräfte nach dieser Methode möglich. Für eine schwächere Stromstärke, deren Grösse nebensächlich ist, betrug die berechnete Stosskraft des Hammers 2390 gr. $\frac{cm}{sek.}$, für eine andere grössere Stromstärke 4900 gr. $\frac{cm}{sek.}$, das Verhältnis beider war also

nahe 1 : 2. Untersucht wurden die ferromagnetischen Körper Eisen, Stahl und Nickel.

1. Versuche an weichem Eisen.

Eine Aufnahme der natürlichen Hysteresiskurve und der zugehörigen Erschütterungskurve, die bei der kleineren Stosskraft 2390 gr. $\frac{\text{cm}}{\text{sek.}}$ aufgenommen wurde, zeigt Tabelle 2.

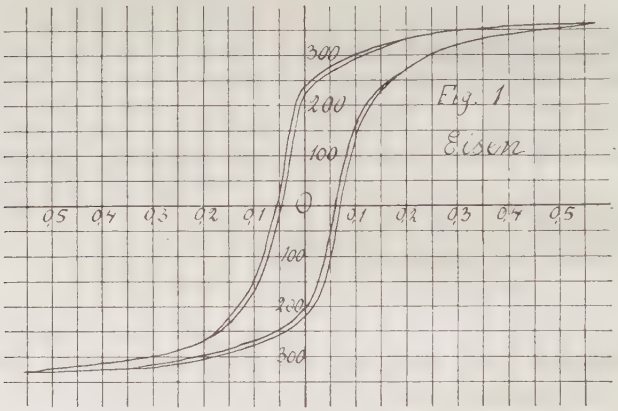


Fig. 1
Eisen

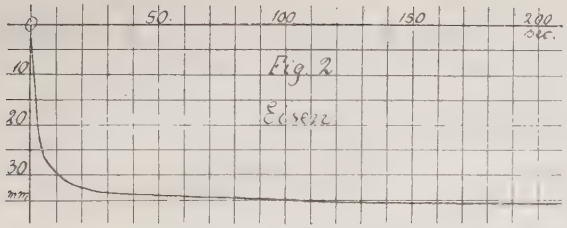
Der Draht war 1,8 mm stark, die Entfernung des Magnetometers von der Spule betrug 60 cm, von der Skala 180 cm. Die Erschütterungsdauer war 7 Minuten. Dass diese Zeit völlig genügte, wird noch gezeigt werden. Zu der Anordnung der Tabelle ist zu bemerken, dass in Spalte 5 die absolute Aenderung des Magnetismus infolge der Erschütterungen, in Spalte 6 die Aenderung in Prozenten von Spalte 3 angegeben ist. Die aus der Tabelle sich ergebenden Kurven stellt Figur 1 dar. Die Ausschläge des Magnetometers sind als Funktion der Stromstärke aufgetragen. Wie aus der Figur ohne weiteres zu entnehmen ist, beeinflussen die Erschütterungen den Magnetismus in der Weise,

dass sie die Hysteresisfläche zu verkleinern suchen. Der Inhalt der natürlichen Hysteresisfläsche, planimetrisch gemessen, ergab im Original den Wert 35,2 cm^2, während der Inhalt der Erschütterungsfläche nur 29 cm^2 betrug. Die beiden Flächen verhalten sich demnach wie 11,8 : 10. Die Maxima der Magnetisierungen, das heisst also das gesättigte Eisen, werden gar nicht oder nur sehr wenig beeinflusst, die Lage der Molekularmagnete ist hier also eine sehr stabile; ihre geringste Stabilität besitzen sie dort, wie die Tabelle zeigt, wo die Richtung des Feldes soeben umgekehrt worden ist, also in der Nähe der Remanenzpunkte. Wir wollen diese Gegend darum die Gegend der geringsten Stabilität nennen. Auch den permanenten Magnetismus selbst kann man dazu rechnen, er ist gegen die Erschütterungen verhältnismässig empfindlich, wie ja auch die Versuche von Fromme bestätigen. Um die Wirkung der verschiedenen Erschütterungskräfte miteinander vergleichen zu können, wurde der Versuch für die grössere Stosskraft 4900 gr. $\frac{cm}{sek.}$ wiederholt. Eine Wiedergabe sowohl der zugehörigen Tabelle wie der Kurven erübrigt sich. Das Verhältnis der Hysteresisflächen wächst auf 12,5 : 10. Während die Kraft mehr als das Doppelte der ersten betrug, ist die Wirkung nicht erheblich gewachsen. Leider war es nicht möglich, bei der Anordnung dieser Arbeit eine grössere Schlagkraft zu erzielen und auf diese Weise noch mehr Daten zu gewinnen, um die Gesetze, die zwischen Schlagkraft und Aenderung des Magnetismus herrschen, genauer formulieren zu können. Wir werden jedoch im zweiten Abschnitt auf ähnliche Verhältnisse wie hier treffen, die sich dort aus noch zu erörternden Gründen genauer untersuchen lassen, und es wird von dort aus möglich sein, ein genaueres Urteil über die hier auftretenden Erscheinungen zu geben. Es liegt die Vermutung nahe, dass die Wirkung der Schläge um so grösser ist, je weicher die Eisensorte ist.

Es wurde daher eine Versuchsreihe an ganz besonders weichem Eisen bei der grösseren Stosskraft 4900 gr. $\frac{cm}{sek.}$ aufgenommen. Die Erschütterung war für diesen Draht noch verhältnismässig kräftiger, weil derselbe nur eine Dicke von 0,9 mm besass. Es mussten allerdings zwei Drähte genommen werden, weil ein einzelner eine zu geringe Wirksamkeit auf das Magnetometer besass. Trotzdem war die Kraft pro Querschnittseinheit noch grösser als beim obigen Versuch. Das Inhaltsverhältnis ergab sich zu 12,1 : 10, bleibt also noch etwas kleiner als beim analogen Versuch für den Draht von 1,8 mm. Trotz der Weichheit des Eisens und des kleineren Querschnitts ist eine grössere Wirkung nicht erzielt; wenngleich Härtegrade zweifellos eine Rolle spielen, wie die Untersuchungen über Stahl auf den nächsten Seiten zeigen, so muss wohl nach den obigen Erfahrungen der Härteunterschied bedeutender sein als bei den beiden hier behandelten Eisensorten, um die Abhängigkeit der Aenderung des Magnetismus von der Härte des Materials erkennen zu lassen. Analoges lässt sich wohl auch für die Abhängigkeit vom Querschnitt sagen.

Wie schon erwähnt, betrug die Dauer der Stösse für jede Stufe 7 Minuten. Dass nicht mehr Zeit nötig war, zeigen die sogenannten Zeitkurven. Ihre Bedeutung ist schon zu Beginn der Arbeit erklärt. Zu ihrer Aufnahme wurde ein neuer Draht durch die Spule gezogen, und sofort die Gegend der geringsten Stabilität im absteigenden Ast der Hysteresiskurve aufgesucht, weil hier die Aenderungen und damit der Messbereich am grössten sind. Nun wurde der Klopfer eingeschaltet und nach einer Erschütterungsdauer von 5 Sekunden wieder ausgeschaltet, um eine Ablesung vorzunehmen. Dies Verfahren wurde bis zur 50. Sekunde von 5 zu 5 Sekunden, dann in einem Zeitabstand von 10 oder 20 Sekunden wiederholt. Die Aenderungen sind als Funktion der Zeit aufgetragen. Figur 2 zeigt zunächst ein

Diagramm, das bei der Stosskraft 4900 gr. $\frac{cm}{sek.}$ auf der Stufe W = 125, Amp. = 0,037 (siehe Tabelle 2) aufgenommen wurde. Die Aenderungen nähern sich asymptotisch dem Endwert, jedoch ist schon nach ungefähr 70 Sekunden die Aenderung so gering, dass man sie vernachlässigen kann. Eine ähnliche Kurve, deren Wiedergabe sich erübrigt, ergab sich, als der Draht durch sehr kräftige mit einem Holzhammer geführte Schläge erschüttert wurde. Gemessen konnte deren Kraft nicht werden, doch wurde dafür Sorge getragen, dass ihre Wucht dieselbe blieb, soweit dies bei Schlägen aus freier Hand möglich war, auch die Periode 50 pro Minute wurde möglichst beibehalten. Der Charakter



der so entstandenen Kurve ist derselbe geblieben, doch sind die Aenderungen ganz ausserordentlich viel grösser als in der Figur 2. Während dort nur Aenderungen bis zu 36 Skalenteilen erzielt wurden, erreichte hier die Aenderung Werte bis zu 154 Skalenteilen. Wie schon erwähnt, wird hiervon im zweiten Abschnitt noch einmal die Rede sein. In bezug der Zeitkurven möchte ich an die Versuche des Herrn Hübers erinnern. Im Gegensatz zum ersten Kapitel dieses Abschnitts sind hier offenbar Analogien zu den entsprechenden Versuchen des Herrn Hübers vorhanden, insofern auch hier Aenderungen des Magnetismus wie dort Aenderungen der Länge auftreten. Jedoch wird hier die Grenze sehr schnell erreicht, während dort noch nach Wochen erhebliche

Dehnungen auftreten. Für die Remanenz wurden ebenfalls Zeitkurven aufgenommen, ihr Charakter ist völlig derselbe, so dass sich ihre Wiedergabe erübrigt.

Bevor wir zu anderen Betrachtungen übergehen, sei bemerkt, dass die jungfräuliche Kurve hier nicht behandelt werden wird, sie ist zwar auch untersucht worden, jedoch sind die Resultate den analogen im zweiten Abschnitt so ähnlich, dass sie erst dort erörtert zu werden brauchen, zumal sie dort noch besser in Erscheinung treten.

2. Versuche an Stahl.

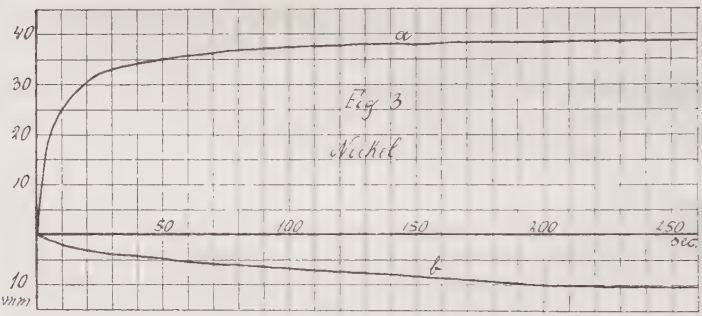
Nach den Versuchen von G. Wiedemann, Ewing und anderen Forschern ist die Wirkung von Erschütterungen auf Stahl erheblich geringer als auf weiches Eisen. Wir werden also auch hier erheblich geringere Wirkungen zu erwarten haben. Tabelle 3 bestätigt diese Annahme. Die Magnetisierungsspannung betrug 10 Volt, der Maximalmagnetisierungsstrom ungefähr 0,9 Amp. Diesem entspricht eine Feldstärke im Innern der Spule von ungefähr 67 absoluten Einheiten. Der Versuchsdraht war Klaviersaitendraht, der eine Stärke von 1,95 mm hatte. Es kamen die Schläge 4900 gr. $\frac{\text{cm}}{\text{sek.}}$ in Anwendung. Die Entfernung des Magnetometers von der Spule betrug 60 cm, von der Skala 200 cm. Eine Wiedergabe der Kurven erübrigt sich. Das Inhaltsverhältnis ist mit einem sehr geringen Fehler $= 1$, d. h. die Kurven fallen zusammen.

3. Versuche an Nickel.

Aus den vorhergehenden Versuchen könnte man den Schluss ziehen, dass auch Nickel gegen Transversalerschütterungen ziemlich unempfindlich ist, da sich sogar sehr weiches Eisen als verhältnismässig hart erwies. Diese Vermutung ist jedoch irrtümlich, wie im folgenden

gezeigt werden wird. Als Magnetisierungsspannung wurde 8 Volt gewählt, wodurch ein Maximalfeld von ungefähr 54 absoluten Einheiten erreicht wurde. Die Dicke des Drahtes betrug 1,45 mm. Wegen der im Verhältnis zu Eisen und Stahl geringen magnetischen Wirksamkeit musste der Abstand des Magnetometers von Spule und Skala erheblich geändert werden. Seine Entfernung von der Spule wurde auf 20 cm, von der Skala auf 240 cm festgesetzt. Tabelle 4 zeigt eine Versuchsreihe, die bei der kleineren Stosskraft 2390 gr. $\frac{\text{cm}}{\text{sek.}}$ aufgenommen worden ist. Die grosse Unsymmetrie der beiderseitigen Ablenkungen gegen die Nulllage wurde nicht allein vom Erdfeld hervorgerufen, sondern rührt besonders daher, dass der Draht schon bei Beginn des Versuchs einen remanenten Magnetismus besass, der durch Ausglühen nicht zu entfernen war. Das Inhaltsverhältnis ergab sich zu 13 : 10, ist also schon bei 2390 gr. $\frac{\text{cm}}{\text{sek.}}$ Schlägen grösser als bei den gleichen Eisen-Kurven, die bei den Schlägen 4900 gr. $\frac{\text{cm}}{\text{sek.}}$ aufgenommen wurden. Trotz der Zähigkeit des Nickels — es ist bekannt, wie schwer es ist, aus Nickel die Remanenz zu entfernen —, ist es also gegen transversale Erschütterungen empfindlicher als weiches Eisen. Die Aenderung des Magnetismus der Stufe W = 80 Amp. = 0,090 in der Tabelle 4, also im aufsteigenden Ast der Hysteresiskurve wurde in Form einer Zeitkurve in Figur 3a dargestellt. Die Tabelle zeigt eine absolute Aenderung von 38 mm an bei einem Gesamtausschlag von 65 mm, während bei der Eisenkurve Tabelle 2 das Maximum der Aenderung nur 36 mm betrug bei einem Gesamtausschlag von 109 mm, ganz abgesehen davon, dass die Magnetisierungen des Eisens sehr viel höhere Werte erreichen als die des Nickels. Die Form der Figur 3a ist eine etwas andere als die Form der Zeitkurve des Eisens

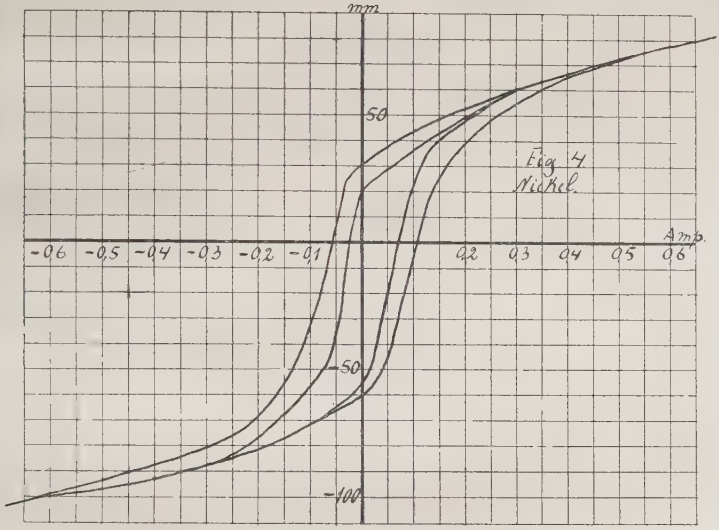
(Fig. 2), trotzdem beide unter gleichen Verhältnissen, die Anzahl der Schläge war hier ebenfalls 50 in der Minute, aufgenommen wurden. Die Hauptänderung vollzieht sich hier zwischen 0 und 70 Sekunden, dort zwischen 0 und 20 Sekunden. Während in Figur 4 anfangs eine gewisse Proportionalität zwischen Aenderung und Zeit besteht, die Kurve verläuft anfangs gradlinig, so liegt hier die Proportionalitätsgrenze, falls man von einer solchen überhaupt reden kann, viel niedriger. Es spricht sich in der Zeitkurve des Nickels deutlich seine grössere Zähigkeit aus. Die Molekularmagnete des Eisens sind geneigt, sehr schnell in eine stabilere Lage überzugehen, während diejenigen des Nickels sich langsamer der Gleichgewichtslage nähern.



Jedoch sind auch hier die Aenderungen nach 7 Minuten schon so gering, dass sie ohne weiteres vernachlässigt werden können.

War schon beim Eisen eine Abhängigkeit der Aenderung von der Schlagstärke zu bemerken, so steht zu vermuten, dass dies in erhöhtem Masse hier der Fall ist. Es wurde darum ein zweites Hysteresiskurvenpaar bei der grösseren Stosskraft 4900 gr. $\frac{\text{cm}}{\text{sek.}}$ aufgenommen, das in Figur 4 dargestellt ist. Das Inhaltsverhältnis ist 23 : 10, es ist hier

also eine ganz ausserordentliche Verkleinerung der natürlichen Fläche eingetreten. Die Abnahme der Remanenz wird schon sehr augenfällig, sie beträgt im absteigenden Ast schon 12 Skalenteile. Eine besondere Eigentümlichkeit dieser Abnahme ist in der Zeitkurve Figur 3b dargestellt. Die Aenderung, in diesem Fall die Abnahme des Magnetismus, vollzog sich nicht wie sonst im Laufe weniger Sekunden, sondern erreichte erst nach 10 Minuten einen praktischen Endwert, der in dem Diagramm nicht registriert werden



konnte. Eine Zeitkurve, die in der folgenden Stufe aufgenommen ist, hat wieder dieselben Eigenschaften wie die übrigen Zeitkurven. Es ist demnach eine besondere Eigenschaft des Nickels, dass es im Feld 0 seinen Magnetismus nur sehr langsam abgibt. Wirken jedoch die Erschütterungen genügend lange, so lässt sich die remanente Magnetisierung um ein beträchtliches herabsetzen. Um zu sehen, wie weit die Remanenz des Nickels sich entfernen lässt, wurden kräftige Hammerschläge gegen den Draht geführt. Die

Aenderung geschah wiederum sehr langsam, doch konnte selbst nach Stunden ein Ende nicht erreicht werden. Hier treten offenbar den Hübersschen Versuchen völlig analoge Erscheinungen auf.

Zweiter Abschnitt.

Magnetische Erschütterungen.

a) Literatur.

Die longitudinalen magnetischen Erschütterungen stellen, wie schon erwähnt wurde, geringe periodische Schwankungen des magnetischen Feldes dar. Ueber den Einfluss von grösseren Feldschwankungen auf das magnetische Moment eines ferromagnetischen Körpers hat vor allem J. A. Ewing eingehende Untersuchungen angestellt.[1]) Er liess in irgendeinem beliebigen Punkte der Magnetisierungskurve das Feld plötzlich auf Null abnehmen, ging dann wieder zum ursprünglichen Feld zurück und wiederholte dies mehrfach. Er fand, dass nach Wiederherstellung des Feldes das magnetische Moment des Drahtes jedesmal einen höheren Wert als vorher besass. Die Unterschiede der Momente wurden jedoch nach jedem Versuch geringer, bis sie nach einer gewissen Anzahl von Aenderungen ganz verschwanden. Wurden die Versuche noch wiederholt, so nahmen die Magnetisierungen immer genau denselben Wert an. Dies Verhalten rührt nach Ewing daher, dass beim ursprünglichen Ansteigen der Kraft die Magnetisierung des Ferromagnetikums durch Hysteresis verzögert wurde. Erst nach mehreren Prozessen wird der die Erhöhung der Magnetisierung hindernde Einfluss der Hysteresis überwunden.

[1]) J. A. Ewing. Magnetische Induktion, deutsche Uebersetzung; Berlin 1892, pag. 93—95.

Nach Versuchen von Gans[1]) muss die Aenderung einen gewissen Wert erreichen, um die Wirkung der Hysteresis zu überwinden. Im anderen Falle, wenn die Aenderung unter diesem Wert bleibt, erreicht die Magnetisierung trotz der Aenderung immer denselben Wert. Da die in der vorliegenden Arbeit vorkommenden Schwankungen der magnetischen Kraft ebenfalls nur verhältnismässig gering sind, so war vorauszusehen, dass sie keinen Einfluss auf das magnetische Moment des ferromagnetischen Körpers besitzen würden. Die Versuche wurden nur zur Vervollständigung der Arbeit unternommen. Es mag hier noch eine Arbeit von C. Fromme erwähnt werden, die er in seinen magnetischen Experimentaluntersuchungen veröffentlicht hat.[2]) Das Resultat war folgendes: Bei wiederholten Magnetisierungen eines noch unmagnetischen Stabes durch dieselbe Kraft kann eine Zunahme und eine Abnahme des temporären Moments erfolgen. Erstere zeigt sich im allgemeinen bei schwächeren, letztere bei stärkeren magnetisierenden Kräften.

Experimentale Untersuchungen über den Einfluss von elektrischen Strömen, die durch den longitudinal magnetisierten Draht geleitet sind und ihn dadurch transversal oder, besser gesagt, zirkular magnetisieren, sind häufig angestellt worden. Transversale magnetische Erschütterungen verursachen diese Ströme erst dann, wenn sie periodisch auftreten und wieder verschwinden oder noch besser, wenn sie ihre Richtung wechseln. Der erste, der den Einfluss galvanischer Ströme auf den Magnetismus von Eisen und Stahl untersucht hat, scheint Gustav Wiedemann[3]) gewesen zu sein. Er veröffentlichte 1862 eine Arbeit „Magnetische Untersuchungen", worin er über seine Resultate schrieb: „Leitet man durch einen temporär magnetisierten Eisendraht einen

[1]) R. Gans, Annalen der Physik; 4. Folge **27**, 2; 1908.
[2]) C. Fromme, Wied. Annalen **4**, 76; 1878.
[3]) G. Wiedemann, Pogg. Annalen **117**, 213; 1862.

Strom direkt hindurch, während der magnetisierende Strom geschlossen bleibt, so vermindert sich sein temporärer Magnetismus. Nach dem Oeffnen des hindurchgeleiteten Stromes tritt der temporäre Magnetismus stärker auf als vorher.“ Ueber das Verhalten des permanenten Magnetismus schreibt er: „Leitet man durch den Draht einen Strom, nachdem der magnetisierende Strom geöffnet ist, so vermindert sich der permanente Magnetismus. Beim Oeffnen des hindurch geleiteten Stromes wächst derselbe wieder ein wenig, aber nicht bis zur früheren Stärke. Wird ein Strom von entgegengesetzter Richtung durch den Draht geleitet, so vermindert sich sein Magnetismus wieder sehr stark.“ Eine Erweiterung dieser Versuche brachte wenige Jahre später Villari[1]) in einer Arbeit: „Ueber die Aenderungen des magnetischen Moments, welche der Zug und das Hindurchleiten eines galvanischen Stromes in einem Stabe von Stahl oder Eisen hervorbringen.“ Es enthält diese Arbeit von Villari manche irrtümliche Resultate, die später von G. Wiedemann[2]) widerlegt sind. Eine andere Art von magnetischen Erschütterungen wendet C. Fromme[3]) an, indem er die Entladungen von Leydener Flaschen durch den Versuchsdraht leitet. Seine Untersuchungen mittels dieser Art von Erschütterungen, die er in der Arbeit „Ueber die Wirkung von Erschütterungen auf den Magnetismus“ veröffentlichte, enthalten im wesentlichen dieselben Resultate, wie die oben erwähnten Arbeiten.

Während alle übrigen Forscher, die sich überhaupt auf diesem Gebiet beschäftigt haben, soweit mir bekannt ist, nur einzelne Punkte auf der jungfräulichen Kurve und das permanente Moment untersucht haben, dehnten die

---

[1]) E. Villari, Pogg. Annalen 117, 213; 1862.

[2]) G. Wiedemann. Die Lehre von der Elektrizität, 1895 Bd. III, pag. 721. Hier findet sich auch eine ausführliche Angabe der übrigen Literatur.

[3]) C. Fromme, Annalen der Physik 63, 314; 1897.

italienischen Forscher Gerosa und Finzi[1]) ihre Versuche in ihrer interessanten Arbeit „Magnetisierung des Eisens unter gleichzeitigem Einfluss von Wechselströmen“ auf die ganze Hysteresiskurve aus. Wie schon der Name ihrer Arbeit sagt, stellten sie die Wechselfelder durch Wechselströme her, die sie durch den Versuchsdraht schickten. Die zirkularen Wechselfelder hatten zur Folge, dass bei Eisen und Nickel eine fast hysteresisfreie Kurve entstand. Die Hysteresiskurve des Stahls erhielt ebenfalls einen sehr viel kleineren Inhalt. Der Einfluss von konstantem und unterbrochenem Gleichstrom wurde in der erwähnten Arbeit ebenfalls untersucht: Der Einfluss des konstanten Stroms war am geringsten, der des unterbrochenen Gleichstroms schon bedeutender, jedoch blieb er noch weit hinter der Wirkung des Wechselstromes zurück. Leider erhielt ich von dieser Arbeit erst Kenntnis, als meine Versuche über denselben Gegenstand schon beendet waren, trotzdem mögen letztere hier mitgeteilt werden, da die Resultate einige interessante Vergleiche mit den Versuchen des ersten Abschnitts zulassen. Im Anschluss an diese Versuche von Gerosa und Finzi möchte ich noch einige Versuche von G. Ercolini[2]) erwähnen, die in neuester Zeit ausgeführt sind. Ercolini stellte ebenfalls fast hysteresisfreie Kurven her, jedoch nicht durch wechselnde Transversalmagnetisierung, sondern durch wechselnde Longitudinalmagnetisierung. Die erforderlichen Wechselfelder müssen jedoch an Intensität hohe vielfache der angewandten konstanten Felder sein.

b) Longitudinal-Erschütterungen.

Die longitudinalen Feldschwankungen wurden folgendermassen erzeugt: In den Stromkreis der Magnetisierungsspule, der im übrigen die gleiche Schaltungsweise wie im ersten Abschnitt besass, war ein Foucault-Unterbrecher ein-

[1]) G. Gerosa u. G. Finzi, Rend. del R. Istituto Lombardo 24. April 1891.
[2]) G. Ercolini, N. Cim. 1, 237; 1911. 2, 213; 1911.

geschaltet. Ihm parallel lag ein fester Widerstand, so dass bei offenem Unterbrecher der Magnetisierungsstrom gezwungen war, seinen Weg durch diesen Widerstand zu nehmen. Der Foucault-Unterbrecher wurde nicht von dem Magnetisierungsstrom in Tätigkeit gesetzt, sondern von einer besonderen Stromquelle betrieben. Wenn daher der Unterbrecher stand, so nahm der Magnetisierungsstrom seinen Weg durch den Unterbrecher, dessen Widerstand gegenüber dem parallel geschalteten Widerstand vernachlässigt werden konnte. Bei offenem Unterbrecher wurde also der Magnetisierungsstrom und damit das Feld in der Spule geschwächt, während bei geschlossenem Unterbrecher eine Verstärkung des Feldes eintrat. Im übrigen ist die Anordnung dieselbe geblieben, an den Versuchsdraht wurde, um ihn zu strecken, ein Gewicht gehängt. Sämtliche Versuche, die ausgeführt wurden, blieben erfolglos, es wurden allerdings einige Ausschläge bemerkt, doch blieben sie immer innerhalb der Beobachtungsfehlergrenze. Diese wurde selbst dann nicht überschritten, als die Schwankungen der Stromstärke 10 % erreichten. Um eine Uebersicht eines Versuches zu geben, sei er in der Tabelle 5 mitgeteilt. Die Versuchsreihe wurde aufgenommen an einem weichen Eisendraht von 1,8 mm Durchmesser. Die Anzahl der Unterbrechungen betrug 119 in der Minute. Die Tabelle ist aus früher gesagtem verständlich, das Feld in der Spule stieg an bis zu 37,5 absoluten Einheiten. Die jungfräuliche Kurve ist in der Tabelle nicht registriert worden. Ausser weichem Eisen wurde noch Stahldraht untersucht, der das gleiche Verhalten zeigte. Von einem Versuch mit Nickel wurde Abstand genommen. Die Tabelle zeigt, dass bei Feldänderungen von der Grössenordnung wie sie hier verwandt wurden, die Vorgänge beim Magnetisieren vollständig reversibel sind, um einen Ausdruck von R. Gans[1]) zu gebrauchen. Die magnetische Induktion

[1]) R. Gans, Annalen der Physik, 4. Folge 27, 2; 1908.

erreicht nach R. Gans bei der Schwächung des Feldes zwar nicht wieder denselben Wert, den sie vorher für das gleiche Feld besass, sie behält einen höheren Wert, da sich die Hysteresis geltend macht, sie kehrt jedoch bei Wiederherstellung des stärkeren Feldes wieder genau in den früheren entsprechenden Wert zurück. Eine solche Rückkehr tritt auch bei den vorliegenden Versuchen auf. Eine Aenderung der Magnetisierung analog den elastischen Erscheinungen bei den Versuchen von Hübers findet hier nicht statt.

c) Transversal-Erschütterungen.

Die Anordnung für den Magnetisierungsstrom ist dieselbe geblieben wie in b, nur dass der Unterbrecher mit dem Widerstand in Fortfall gekommen ist. Zur Herstellung der magnetischen Transversalerschütterungen wird ein elektrischer Strom durch den Versuchsdraht geleitet. Zu diesem Zweck wurde oberhalb und unterhalb der Magnetisierungsspule am Versuchsdraht je eine Klemme befestigt, an welche eine Stromquelle = 8 Volt gelegt wurde. Zur Regulierung des Erschütterungsstromes wurde ein veränderlicher Widerstand (maximal 3 Ohm) und zur genauen Bestimmung der Stromstärke ein empfindliches Amperemeter in den Stromkreis eingeschaltet. Wie später noch genauer erörtert wird, ist bei der Herstellung der zirkularen Felder sowohl Gleich- wie Wechselstrom gebraucht. Zur Erzeugung der Gleichstromstösse wurde wieder ein Foucault-Unterbrecher benutzt, der in den Erschütterungs-Stromkreis eingeschaltet wurde, während als Wechselstrom kommutierter Gleichstrom, erzeugt durch einen rotierenden Umschalter, in Anwendung kam.

1. Versuche an weichem Eisen.

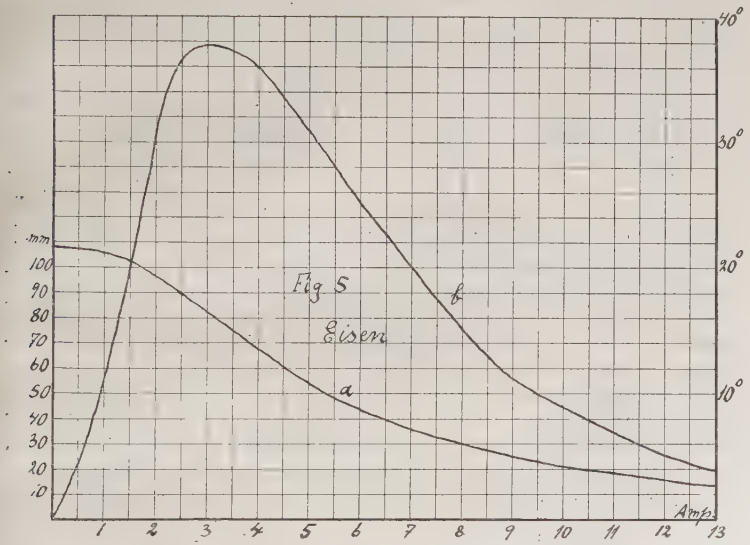
a) Mit unterbrochenem Gleichstrom.

Es sei zunächt ein Versuch mit weichem Eisen wiedergegeben. Die Magnetisierungsspannung betrug 6 Volt.

Der Eisendraht besass eine Dicke von 1,8 mm. Die Entfernung des Magnetometers von der Spule betrug 60 cm, von der Skala 210 cm. Die Maximalmagnetisierungsstromstärke betrug 0,559 Ampere, so dass in der Spule ein Maximum des Feldes von 42 absoluten Einheiten erreicht wurde.

Schon im ersten Abschnitt wurde auf die Abhängigkeit der Aenderung der Magnetisierung von der Stärke der Erschütterungen hingewiesen. Während dort die Stärke der Erschütterungen nur schwierig und ungenau festgestellt werden konnte, ist hier die genaue Feststellung der Stärke der Erschütterungen sehr einfach, da sie nur von der Stärke des durch den Versuchsdraht gesandten Stromes abhängig ist, die durch ein Amperemeter direkt abgelesen werden kann. Um das Gesetz zwischen Stärke der Erschütterungen und Aenderung der Magnetisierung zu ermitteln, könnte man für eine Reihe von Erschütterungsstromstärken die Hysteresiskurven aufnehmen, den Inhalt planimetrieren und die Inhalte dann als Funktion der Stromstärke auftragen. Derselbe Zweck ist jedoch auch dadurch zu erreichen, dass wir nur für eine einzige Stufe die Abhängigkeit von der Stromstärke feststellen, wodurch ebenfalls ein Bild vom Einfluss der Erschütterungsstärke erhalten wird. Im folgenden wurde dafür als zu untersuchende Stufe die Remanenz im absteigenden Teil der Magnetisierungskurve gewählt. Die Aufnahme gibt Figur 5 a wieder. Als Abszissen sind also die Stärken des durch den Draht gesandten unterbrochenen Gleichstromes, als Ordinaten die Aenderungen, das heisst also die Ausschläge des Magnetometers aufgetragen. Die Zahlen auf der linken Ordinatenachse gelten für Figur 5 a, diejenigen auf der rechten Ordinatenachse für Figur 5 b. Das Maximum der Erschütterungsstromstärke betrug 13 Ampere. Höhere Werte wurden nicht genommen, weil dann eine zu grosse Erwärmung des Versuchsdrahtes eingetreten wäre. Sie war

schon bei 13 Ampere sehr beträchtlich. Bei höheren Stromstärken ist ein Teil der Entmagnetisierung der Erwärmung zuzuschreiben. Die Erschütterungen dauerten für jede registrierte Stromstärke solange, bis keine Aenderungen mehr eintraten. Die Figur beweist, dass die Wirkung der Erschütterungen bis zu Stromstärken von 1 Ampere verhältnismässig gering ist, dass dann aber mit wachsender Stromstärke die Aenderungen ausserordentlich rasch zunehmen. Die Stromstärke, bei der diese Zunahme der



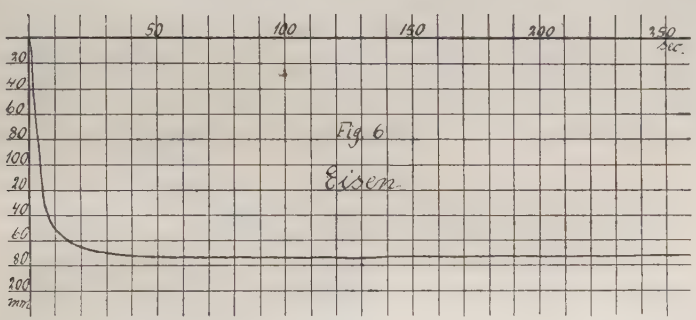
Wirkung einsetzt, ist ziemlich scharf ausgeprägt, sie liegt bei ungefähr 1,5 Ampere, wo die Kurve plötzlich eine scharfe Biegung erhält. Wir wollen sie „Kritische Stromstärke“ nennen. Die verhältnismässig grössten Aenderungen verursachen die Stromstärken zwischen 2 und 5 Ampere, hier erreicht der Wirkungsgrad der magnetischen Erschütterungen sein Maximum. Tragen wir die Neigungswinkel der Kurve gegen die Abszisse für die einzelnen Stromstärken als Funktion des Erschütterungsstromes auf,

wie dies in Figur 5 b geschehen ist, so erhalten wir ein anschauliches Bild von der Verteilung des Wirkungsgrades der verschiedenen Stromstärken. Für 3 Ampere erreicht dieser schon sein Maximum, die relativen Aenderungen nehmen dann schon wieder ab, während die absoluten natürlich um so grösser sind, je grösser die Erschütterungen sind. Es ist zu vermuten, dass ähnliche Erscheinungen auch im ersten Abschnitt existieren. Ich möchte daher an dieser Stelle noch einmal auf die betreffenden Versuche des ersten Abschnitts zurückgreifen. Es war dort nicht möglich[1]), ein genaueres Gesetz zwischen Stärke der Erschütterungen und Aenderung des Magnetismus zu erhalten, weil die Grösse der Erschütterungen dort nicht mit der erforderlichen Leichtigkeit festzustellen war und vor allen Dingen auch deshalb, weil die Schlagstärken nicht in genügender Weise abzuändern waren. Nehmen wir dort ähnliche Verhältnisse wie hier an, so müssen wir auch annehmen, dass es dort eine kritische Schlagstärke entsprechend der kritischen Stromstärke gibt. Es ist diese Annahme um so wahrscheinlicher, weil wir durch Hammerschläge, deren Stärke leider nicht zu messen war, ausserordentlich grosse Aenderungen erhielten, sehr viel grösser, als man nach der Stärke der Hammerschläge hätte vermuten sollen. Nimmt man also dort die gleichen Verhältnisse an, so war in den beiden Versuchen für weiches Eisen die kritische Schlagstärke noch nicht erreicht, während sie in den beiden Versuchen für Nickel wohl schon überschritten war.

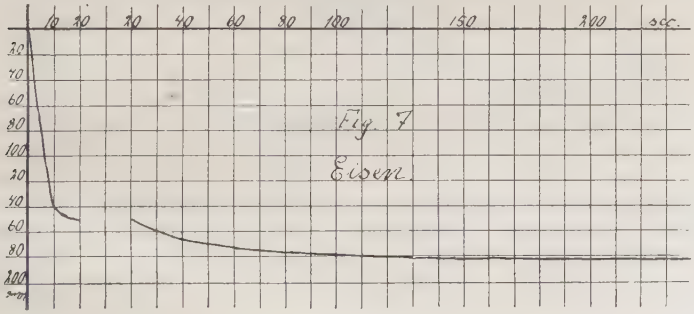
Die Zeitkurven, die in derselben Gegend der Magnetisierungskurve wie die analogen Kurven des ersten Abschnitts aufgenommen wurden, besitzen dieselbe Form wie dort: starkes Abfallen der Kurve in den ersten 30 Sekunden, dann langsame Annäherung an die Grenze sind auch hier die charakteristischen Merkmale. Um hier

[1]) Siehe Seite 19.

die gleichen Bedingungen wie dort herzustellen, war die Periode des Unterbrechers 50 in der Minute, der Draht wurde also 50mal in der Minute erschüttert, wie bei den Transversal-Erschütterungen des ersten Abschnitts. Die Zeitkurve, Figur 6, die bei 4 Ampere Erschütterungsstrom

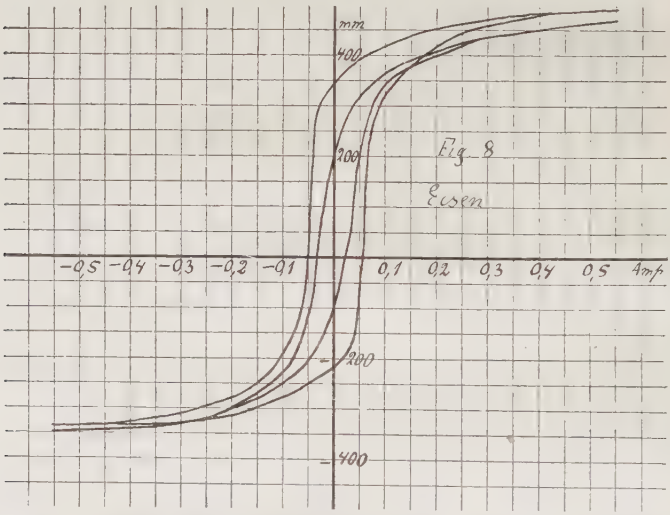


aufgenommen wurde, fällt nur auf durch die ausserordentlich viel höhere Aenderung des magnetischen Moments: Die Gesamtänderung beträgt hier 160 Skalenteile in 30 Sekunden, während sie im ersten Abschnitt für die analoge Kurve nur



36 Teile betrug. Nach dem vorher Gesagten ist diese starke Aenderung ohne weiteres verständlich. Figur 7 stellt ebenfalls eine Zeitkurve dar. Sie entstand in derselben Weise wie die vorige, nur wurden nach der 20. Sekunde nicht mehr Stromstösse, sondern konstanter Gleichstrom

eine halbe Stunde lang durch den Versuchsdraht gesandt. Dann wurden die Stromstösse in der früheren Weise fortgesetzt. Wie die Figur zeigt, besitzt der konstante Gleichstrom keine Wirkung auf die Aenderung mehr, das magnetische Moment blieb während seiner Dauer unverändert. Die dann wieder einsetzenden Stromstösse rufen sofort wieder eine Aenderung des Momentes hervor, es sind also die Stromstösse bei weitem wirksamer als konstanter Gleichstrom. Die Kurve besitzt noch eine zweite auffallende Eigentümlichkeit. Sie besitzt nämlich gleich nach dem



Wiedereinsetzen der Stromstösse eine bedeutend grössere Neigung gegen die Abszisse wie beim Aufhören derselben.

Hier liegen offenbar ähnliche Erscheinungen einer latenten Nachwirkung vor, wie bei den entsprechenden elastischen Versuchen von Hübers.[1])

Nach den obigen Erfahrungen ist es leicht, eine beträchtliche Verkleinerung der Hysteresisfläche zu erzielen:

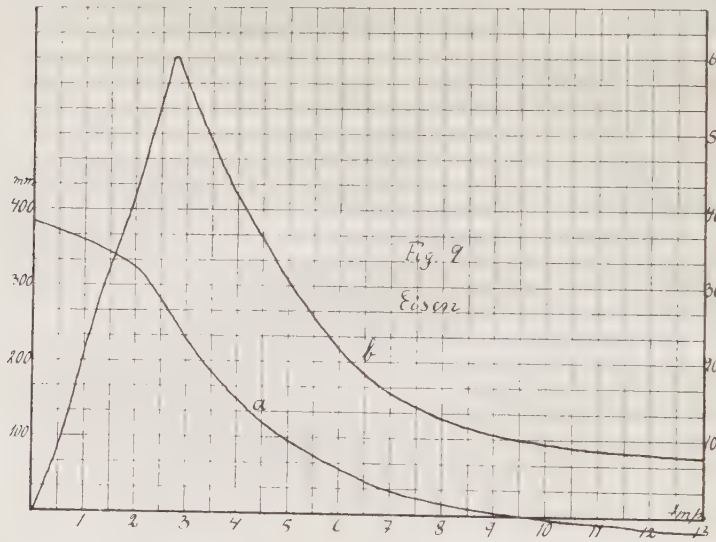
[1]) Vergl. G. Hübers, Inaugural-Dissertation, Rostock 1909, p. 12 und Fig. 6.

Die Kurve muss mit einer Erschütterungsstromstärke hergestellt werden, die grösser ist als die kritische Stromstärke. In der Tat zeigt sich bei ungefähr 1,5 Ampere eine verhältnismässig kleine Aenderung der Hysteresisfläche im Verhältnis 13 : 10. Im Gegensatz dazu zeigt Figur 8, die bei 3 Ampere aufgenommen wurde, eine bedeutende Verkleinerung der Fläche, das Inhaltsverhältnis ist hier fast 30 : 10. Eine ganz hysteresisfreie Kurve lässt sich jedoch, wie aus der Form der Amperekurve (Fig. 5 a) zu schliessen ist, in dieser Weise nicht herstellen.

b) Mit Wechselströmen.

Zur Erzeugung der Wechselströme wurde, wie schon bemerkt, ein rotierender Gleichstromkommutator verwandt, der von einem Heissluftmotor angetrieben wurde. Die Anzahl der Wechsel berechnete sich aus der Umdrehungszahl des Motors und der Anzahl der Kupferlamellen auf dem Kommutator zu ungefähr 20 pro Sekunde. Die Einschaltung des Kommutators in den Stromkreis war so vorgenommen, dass der Wechselstrom nur durch den Versuchsdraht ging, die Stromstärke konnte also durch ein Gleichstromamperemeter gemessen werden. Der Foucault-Unterbrecher kam natürlich in Fortfall. Wegen der ziemlich hohen Periodenzahl müssen die später angegebenen Stromstärken, die im Ruhezustande des Kommutators abgelesen wurden, als zu hoch angesehen werden. Wegen der Selbstinduktion des Versuchsdrahtes kamen die Ströme wahrscheinlich nicht voll zur Entwicklung. Untersucht wurde 1,8 mm starker Draht, ein dünnerer Draht wurde nicht gewählt, um grössere Fehler durch Wärmeentwicklung zu vermeiden. Der Abstand des Magnetometers von Spule und Skala blieb daher derselbe. Wie schon Gerosa und Finzi fanden, ist Wechselstrom noch bei weitem wirksamer als unterbrochener Gleichstrom, nach ihren Versuchen

vermag er die Remanenz fast völlig zu entfernen. Die hierzu geeignete Stromstärke gibt die Amperekurve an. Figur 9a zeigt, dass bei $9^1/_2$ Ampere die vollständige Vernichtung des magnetischen Moments eingetreten ist, das der Draht vor dem Versuch besass. Dass die Kurve noch unter die Nullinie fällt, rührt vielleicht daher, dass der Draht schon bei Beginn des Versuchs einen gewissen remanenten Magnetismus besass. Wahrscheinlicher jedoch



ist, dass das Erdfeld diese Erscheinung hervorgebracht hat, das ja bei diesen Versuchen nicht kompensiert war. Zum Verständnis dieser Behauptung möge folgendes dienen: Die zirkularen Wechselfelder haben die Wirkung auf den Draht, dass sie seine Molekularmagnete der Gleichgewichtslage, die durch das magnetische Feld bedingt ist, sehr nahe bringen. Ist das Feld absolut Null, so wird jeder Magnetismus des Drahtes in longitudinaler Richtung vernichtet. Steht aber der Draht unter dem Einfluss irgendeines magnetischen Feldes, so wird das magnetische Moment des Drahtes,

unbeeinflusst von der Hysteresis, den Wert annehmen, der tatsächlich dem Felde entspricht, es wird also die maximale Magnetisierung erreicht werden, die für ein gegebenes Feld und für ein gegebenes Material nur erreicht werden kann.

Ist nun, wie im vorliegenden Versuch, das Erdfeld dem Felde der Spule entgegengerichtet, so werden die zirkularen Wechselmagnetisierungen das magnetische Moment herstellen, das dem Erdfelde und zwar unbeeinflusst von der Hysteresis entspricht. Das Moment wird jetzt die entgegengesetzte Richtung wie früher besitzen, das heisst das Magnetometer muss notwendig negative Ausschläge anzeigen.

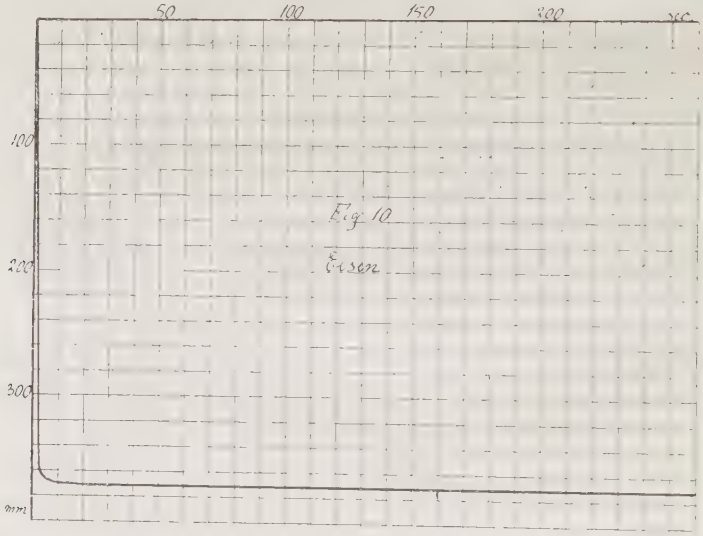
Es können also die Wechselströme auch dazu dienen, die dem Erdfelde entsprechende maximale Magnetisierung im Eisen hervorzubringen.

In der Figur 9 a tritt wie in Figur 5 a die kritische Stromstärke sehr deutlich hervor, sie liegt ungefähr in derselben Gegend wie dort. Der grösste Wirkungsgrad liegt ebenfalls zwischen 2 und 5 Ampere, das Maximum erreicht hier noch einen weit höheren Wert, wie Figur 9 b veranschaulicht. Die grösste Neigung liegt wiederum bei 3 Ampere, sie erreicht fast 60^0. Es musste darum für die Ordinate ein kleinerer Masstab wie in Figur 5 b gewählt werden.

Die grössere, man möchte fast sagen gewaltsame, Wirkung der Wechselfelder zeigt sich in dem Vergleich von Zeitkurven. Zunächst wurde eine solche aufgenommen unter denselben Bedingungen wie bei der Aufnahme für unterbrochenen Gleichstrom (Fig. 6), also bei 4 Ampere Erschütterungsstrom. Diese Aufnahme gibt Figur 10 wieder. Sie zeigt eine mehr als doppelt so grosse Wirkung des Wechselstromes, die Aenderung beträgt 360 Skalenteile. Vor allem fällt die Kurve dadurch auf, dass der Endwert der Aenderung schon nach 10 Sekunden erreicht ist. Die Schnelligkeit, mit der die Annäherung an die Gleichgewichtslage erfolgt, ist also eine ganz ausserordentliche. In dieser

Beziehung lässt sich jedoch ein direkter Vergleich mit den Zeitkurven für unterbrochenen Gleichstrom nicht ziehen, weil die Periode, also die Anzahl der Erschütterungen, in der gleichen Zeit eine weit höhere ist als dort.

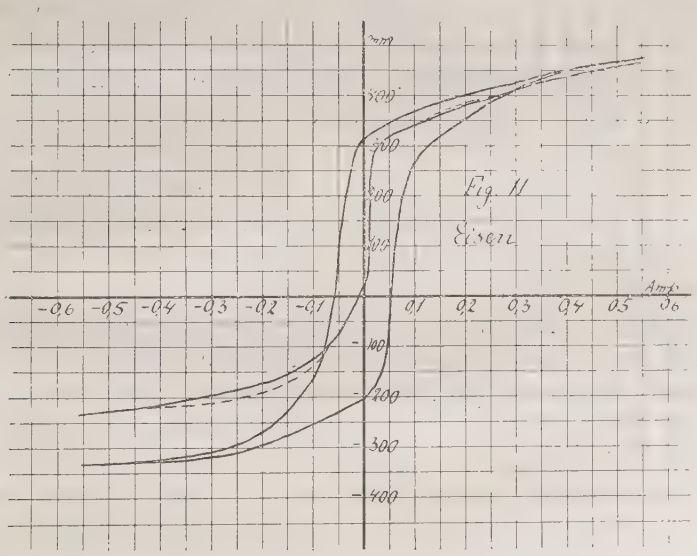
Um zu sehen, ob die Aenderung im Felde 0, also die Entfernung der Remanenz, ebenso rasch geschieht, wurde ein gleiches Diagramm bei 10 Ampere im Feld 0 auf dem absteigenden Ast der Hysteresiskurve aufgenommen. Die Kurve, die hier nicht wiedergegeben ist, zeigt, dass die



Entmagnetisierung schon nach 15 Sekunden eingetreten ist, es gelten hier also dieselben Gesetze wie oben.

Wenn die Remanenz verschwunden ist, so muss (abgesehen von Ablesungsfehlern infolge der Erdströme) die Hysteresiskurve durch den Anfangspunkt gehen, die Erschütterungskurve muss demnach für Hin- und Rückgang dieselbe sein. Für welchen Wert der Erschütterungsstromstärke dieser Fall eintritt, zeigt die Amperekurve, es sind dafür mindestens 9,5 Ampere nötig. Die Aufnahme einer

solchen hysteresisfreien Kurve ist in der Tabelle 6 wiedergegeben. Das zugehörige Diagramm zeigt Figur 11. Es hat ein etwas anderes Aussehen, als erwartet wurde. Zunächst besitzt schon die natürliche Hysteresiskurve eine Unsymmetrie gegen die Abszisse, die sich jedoch durch die Wirkung des Erdfeldes erklären lässt, das in diesem Fall die gleiche Richtung wie das Feld in der Spule besass. Vielleicht besass der Versuchsdraht ausserdem schon etwas positive Remanenz, denn die Unsymmetrie ist zu gross,

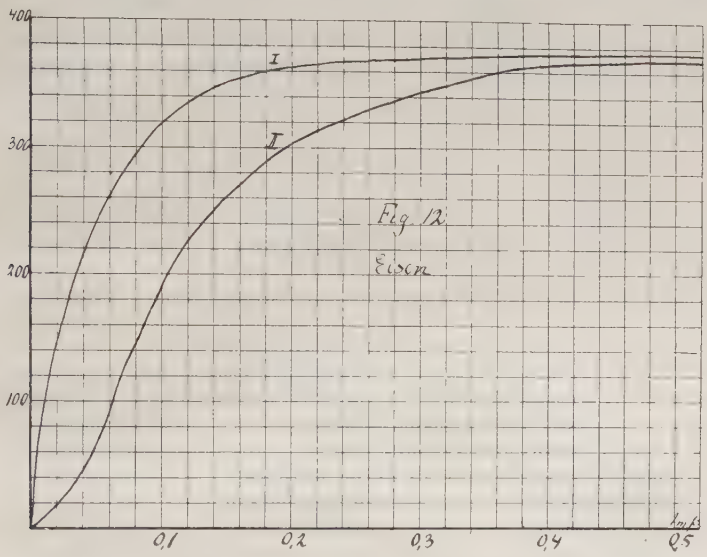


als dass sie sich allein durch das Erdfeld erklären liesse. Auffallend jedoch ist die Unsymmetrie der Erschütterungskurve gegen die natürliche Kurve. Diese Unsymmetrie trat bei allen Aufnahmen auf, die gemacht wurden; die vorliegende Aufnahme ist die beste von allen, die hergestellt wurden. Diese Erscheinung hat sich nicht hinreichend erklären lassen, allein vom Erdfeld kann sie nicht herrühren. Eine gewisse Unsymmetrie gegen die natürliche Kurve ist allerdings durch das Erdfeld bedingt. Denn im Feld 0 wird

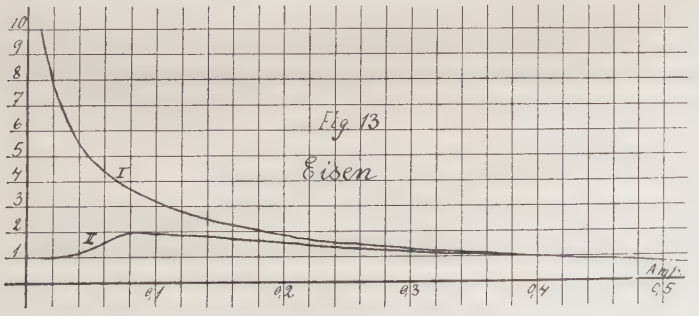
nicht der Anfangspunkt erreicht werden, sondern es wird unter dem Einfluss des (positiv gerichteten) Erdfeldes ein diesem entsprechendes magnetisches Moment zurückbleiben. Es beträgt nach der Tabelle 20 Skalenteile, auf Hin- und Rückgang geht die Kurve genau durch denselben Punkt. Eine gewisse Unsymmetrie muss also die Erschütterungskurve gegen die natürliche Kurve notwendig besitzen, doch lassen sich die grossen Abweichungen dadurch nicht in befriedigendem Masse erklären. Im übrigen zeigt die Erschütterungskurve dieselben Eigenschaften wie die Aufnahmen von Gerosa und Finzi, also ein fast völliges Verschwinden des Inhalts. Die geringere Verschiebung in den äusseren Teilen der Kurve für Hin- und Rückgang beruht wohl auf unvermeidlichen Ablesungsfehlern.

Der ausserordentlich steile Abfall der Kurve deutet auf sehr hohe Werte der Permeabilität hin. Die Aenderung der Permeabilität infolge der Erschütterungen ist von besonderem Interesse bei der jungfräulichen Kurve. Die Aufnahmen mussten in etwas anderer Weise als bisher geschehen, da naturgemäss nicht beide Ablesungsreihen an ein und demselben Draht aufgenommen werden konnten. Nach Fertigstellung der natürlichen jungfräulichen Kurve wurde daher ein anderer jungfräulicher Draht gleicher Sorte von denselben Abmessungen in die Spule gezogen, und nun eine jungfräuliche Kurve mit Erschütterungen aufgenommen. Dabei wurde beachtet, dass der Draht in der Spule dieselbe Lage wie der frühere einnahm. So entstand das Diagramm Figur 12. Die Erschütterungskurve zeigt für verhältnismässig geringe Feldstärken schon sehr hohe Magnetisierungen; da die Permeabilität das Verhältnis von Magnetisierung zu Feldstärke, diese aber wieder der Magnetisierungsstromstärke proportional ist, so erhält man ein Bild von der Aenderung der Permeabilität infolge der Erschütterungen, wenn man für beide Kurven das Verhältnis der Magnetisierung zur Stromstärke als Funktion der Strom-

stärke aufträgt. Dies ist in Figur 13 geschehen. Die Ordinaten enthalten also nur Verhältniszahlen, nicht absolute Werte. Die Figur soll nur eine Darstellung geben von der

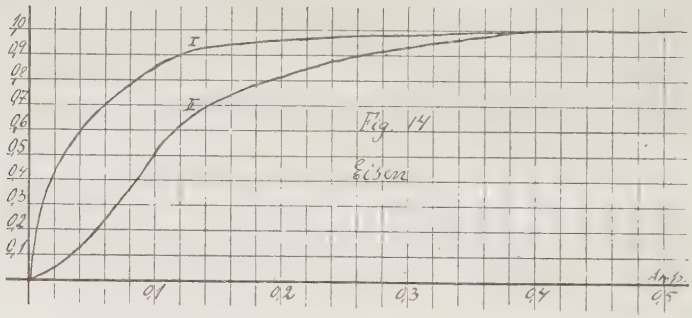


Wirkung der Erschütterungen auf die Permeabilität. Die Permeabilität ist anfangs mehr als zehnmal so gross bei



der Erschütterungskurve als bei der natürlichen Kurve. Sie fällt aber sehr rasch und bei mittleren Feldstärken schon ist der Unterschied nur noch klein. Es sei mir hier

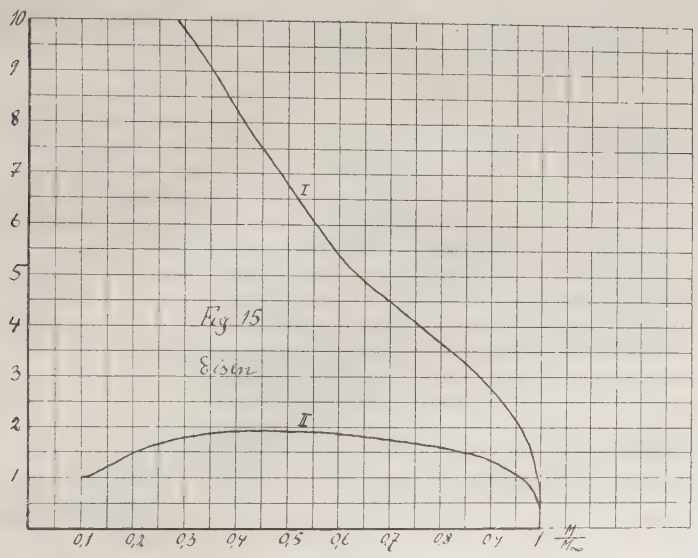
eine Zwischenbemerkung gestattet. Dividiert man in die Magnetisierung, die durch die Sättigung des Eisens gegeben ist, die Magnetisierung an irgendeiner Stelle der Hysteresiskurve oder der jungfräulichen Kurve, so erhält man eine Grösse, die R. Gans[1]) die reduzierte Magnetisierung genannt hat. Sie erlangt also für die Grenze den Wert 1. Nennt man die beliebige Magnetisierung M, die grösste Magnetisierung für das gesättigte Eisen M_∞, so stellt $\frac{M}{M_\infty}$ die reduzierte Magnetisierung dar, die also im äussersten Falle $= 1$, sonst immer ein echter Bruch ist. In Figur 14 ist für Figur 12 $\frac{M}{M_\infty}$ als Funktion der Magnetisierungsstromstärke aufgetragen.



Greift man für gleiche Stromstärken aus Figur 13 und Figur 14 die reduzierten Magnetisierungen und die Permeabilitäten für beide Kurvenpaare heraus und trägt die Permeabilitäten als Funktion von $\frac{M}{M_\infty}$ auf, wie dies in Figur 15 geschehen ist, so erhält man ein Bild vom Zusammenhang zwischen Permeabilität und reduzierter Magnetisierung. Bei der Erschütterungskurve ist für kleine Magnetisierungen die Permeabilität ausserordentlich gross, sie bleibt bis zu einer gewissen Magnetisierung annähernd

[1]) R. Gans, Annalen der Physik 4. Folge 33, 1095; 1910.

konstant, dann beginnt sie zu fallen. Sie hat im Anfang ihren höchsten Wert. Bei der natürlichen Kurve erhalten wir ebenfalls für kleine Magnetisierungen konstante Werte der Permeabilität, im Gegensatz zur Erschütterungskurve ist die Permeabilität sehr klein. Sie wächst dann bis zu einem gewissen Maximum und fällt gegen Ende mit der Erschütterungskurve zusammen. Für $\frac{M}{M_\infty} = 1$ erhält man in beiden Fällen Werte, die auf 0 absinken.



2. Versuche an Stahl.

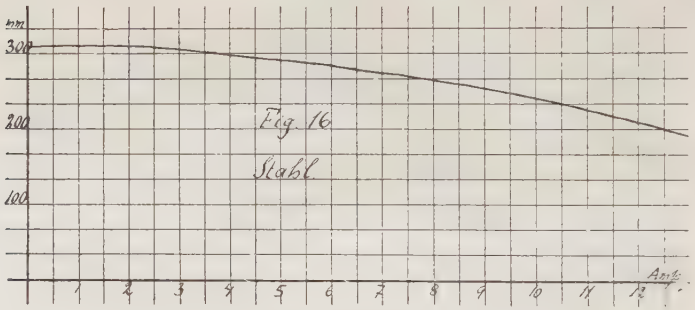
a) Mit unterbrochenem Gleichstrom.

Die Magnetisierungsspannung betrug 10 Volt wie im ersten Abschnitt, Material und seine Dimensionen waren ebenfalls dieselben. Die Aenderungen durch unterbrochenen Gleichstrom sind sehr gering.

Ein Versuch, der mit 4 Ampere angestellt wurde, sei in Tabelle 7 wiedergegeben. Die Tabelle zeigt die ausserordentliche Widerstandsfähigkeit und Stabilität des magnetischen Moments des Stahls gegen die Erschütterungen. Die Wiedergabe der Kurven erübrigt sich. Wir wollen sofort zur Erörterung der Versuche mit Wechselströmen übergehen.

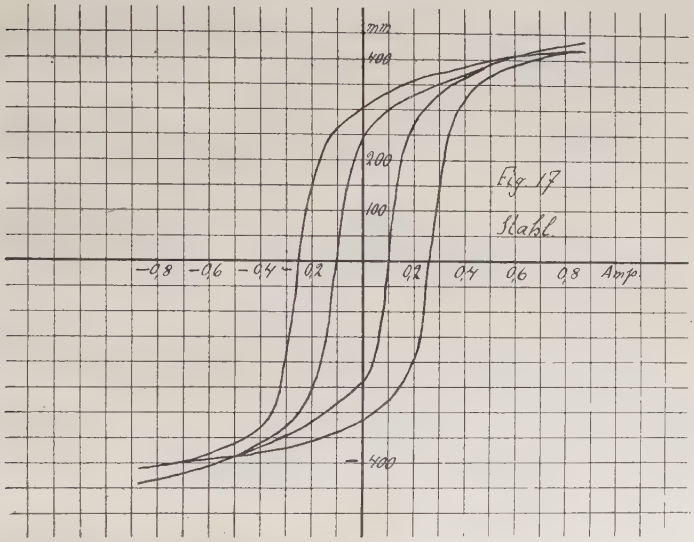
b) Mit Wechselströmen.

Um eine Uebersicht über den Einfluss von Wechselströmen zu gewinnen, wurde eine Amperekurve im Feld 0 wie in früheren Versuchen aufgenommen. Figur 16 stellt



die Aufnahme dar. Gemessen wurde wie früher bis zu 13 Ampere, wo schon eine beträchtliche Erwärmung des 1,95 mm starken Drahtes eintrat. Das Diagramm zeigt eine von den früheren Aufnahmen völlig verschiedene Form. Zunächst fällt die sehr viel schwächere Wirkung der Transversalerschütterungen auf, als beim weichen Eisen, bei 13 Ampere ist der Draht noch nicht zur Hälfte entmagnetisiert. Die Kurve zeigt keine Biegung, die die Gegend der kritischen Stromstärke kennzeichnet, wie die früheren analogen Diagramme für Eisen, eine eigentliche kritische Stromstärke ist also nicht vorhanden. Der Wirkungsgrad, der früher schon bei 3 Ampere sein Maximum erreichte, steigt hier stetig bis zum Schluss, sein Maximum

lässt sich nicht angeben, da bei noch höheren Stromstärken die eintretende Erwärmung einen beträchtlichen Einfluss auf die Entmagnetisierung gewinnt, besonders aber dadurch auch die Natur des Stahls ändert. Aus dem Diagramm geht hervor, dass eine vollständige longitudinale Entmagnetisierung dieses Stahls mit transversalen Wechselfeldern nicht möglich ist, es bleibt immer eine sehr beträchtliche Magnetismusmenge zurück. Hieraus folgt weiter, dass der Inhalt der

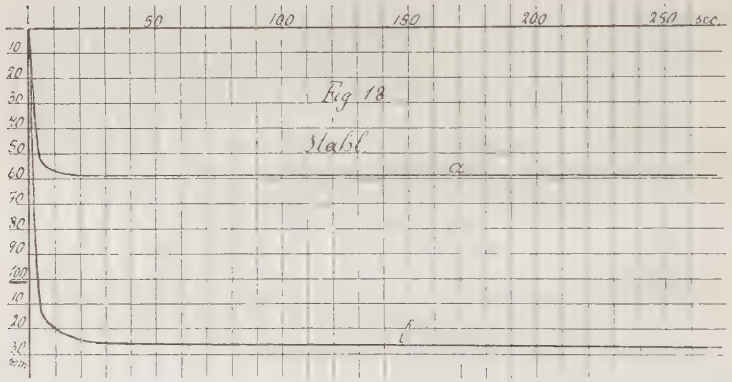


Hysteresiskurve nicht zum Verschwinden gebracht werden kann, sondern dass ihr Inhalt immer von Null verschieden sein muss. Eine ähnliche Aufnahme wie für weiches Eisen ist also für Stahl nicht möglich. Dies Resultat ist in guter Uebereinstimmung mit den Versuchen von Gerosa und Finzi, die hysteresisfreie Kurven für Stahl ebenfalls nicht herstellen konnten.

Im Gegensatz zu den Aenderungen durch unterbrochenen Gleichstrom ist aber die Aenderung recht

beträchtlich, wie Tabelle 8 zeigt, die bei 4 Ampere aufgenommen wurde. Das Inhaltsverhältnis der Hysteresisflächen ist 12,5 : 10. Wie aus der Amperekurve zu entnehmen ist, ist die Wirkung der 4-Ampere-Erschütterungen noch sehr gering. Ein unverhältnismässig grösseres Inhaltsverhältnis, nämlich 28 : 10, besitzen die Diagramme Figur 17, die bei 9 Ampere entstanden sind.

Wenn auch der Stahl gegen die Erschütterungen sehr hart ist, so ist er doch nicht zähe, wie die Zeitkurven beweisen. Wie Eisen, so ändert auch Stahl seinen Magnetismus unter dem Einfluss der Wechselfelder sehr

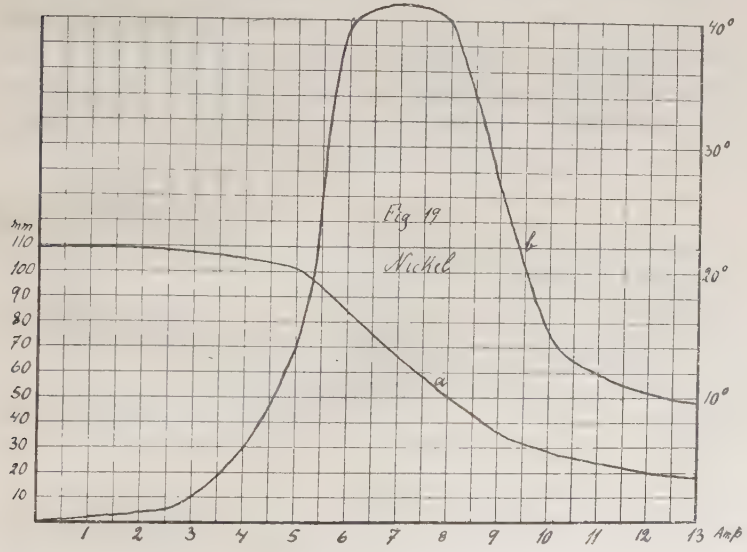


rasch, in derselben kurzen Zeitspanne wie Eisen. Figur 18a und Figur 18b enthalten solche Zeitkurven, von denen die erste im Feld 0, die zweite auf der Stufe 125 Ohm, 0,072 Amp., beide im absteigenden Ast der Kurve Figur 17 aufgenommen sind.

3. Versuche an Nickeldraht.

Material, Entfernung des Magnetometers usw. waren dieselben wie im ersten Abschnitt. Es kamen hier nur Wechselströme in Anwendung. Zunächst sei in Figur 19a

eine Amperekurve, aufgenommen bei der Remanenz, wiedergegeben. Ihrer ganzen Gestalt nach zeigt sie mehr Aehnlichkeit mit der gleichen Kurve für Eisen als mit der des Stahls. Die kritische Stromstärke ist ausserordentlich gut ausgeprägt, sie liegt ungefähr bei 5 Ampere. Der Wirkungsgrad erreicht sein Maximum zwischen 6 und 8 Ampere und ist zwischen diesen Grenzen annähernd konstant: Die Neigung beträgt hier fast genau 40°.

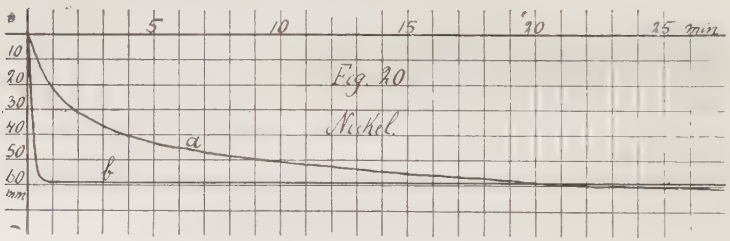


Figur 19 b stellt die Wirkungsgradkurve dar, die von 6 bis 8 Ampere annähernd die gleiche Ordinate besitzt. Wahrscheinlich ist diese Erscheinung nicht so scharf ausgeprägt, wie es nach der Figur der Fall ist. Die analogen Kurven für Eisen besitzen ein anderes Profil wie Figur 19 b. In Wahrheit werden wohl die Verhältnisse hier die gleichen wie dort sein.

Die Nulllinie erreicht die Amperekurve nicht, eine vollständige Entmagnetisierung ist bei Nickel also ebenfalls

mit Hilfe der zirkularen Wechselfelder nicht möglich. Auch wenn man annehmen würde, dass die Kurve die Neigung bis zum Schnitt mit der Abszisse beibehalten würde — es ist aber weit eher zu vermuten, dass die Neigung noch abnimmt —, so würden so hohe Stromstärken erreicht werden, dass schon vor der Entmagnetisierung durch die wechselnden Felder eine solche durch die Erwärmung eingetreten wäre. Die Kurve stürzt also bei ihrer Fortsetzung wahrscheinlich in irgendeinem Punkte steil zur Abszisse ab.

Wie aus der gleichen Kurve für Stahl kann auch aus dieser geschlossen werden, dass ein Verschwinden der Hysteresisfläche unmöglich ist, bei alleiniger Einwirkung der transversalen Wechselmagnetisierungen muss immer noch eine Hysteresisfläche entstehen.



Schon im ersten Abschnitt wies der remanente Magnetismus des Nickels eine ausserordentliche Zähigkeit auf. Wir finden diese Erscheinung hier ebenfalls vor. Die Aufnahme der Amperekurve, die ja im Felde 0, das heisst im Erdfeld geschah, nahm ungefähr eine Zeit von 4 Stunden in Anspruch, die früheren Aufnahmen dauerten nur ungefähr 10 Minuten. Es war also für diese Aufnahme das 24fache der früheren Zeit notwendig. Der jeder einzelnen Stromstärke entsprechende Endwert wird ausserordentlich langsam erreicht, wie auch die Zeitkurve, Figur 20a, zeigt. Die Kurve wurde bei 6 Ampere entwickelt, die Abszisse trägt die Zeitangabe in Minuten, es sind also bis zur Erreichung

des Endwertes etwa 22 Minuten erforderlich gewesen. Stahl und Eisen besitzen diese Eigenschaft nach früheren Versuchen nicht, sie ist nur dem Nickel eigentümlich. Dies Verhalten ist um so auffallender, als an einer andern Stelle der Hysteresiskurve, wo das Feld nicht nahe gleich 0 ist, die Einstellung des Endwertes schon nach wenigen Sekunden erfolgt, wie bei Eisen und Stahl (Figur 20 b).

Die Tatsache, dass sowohl im ersten wie im zweiten Abschnitt das Nickel das gleiche Verhalten zeigt, lässt vermuten,

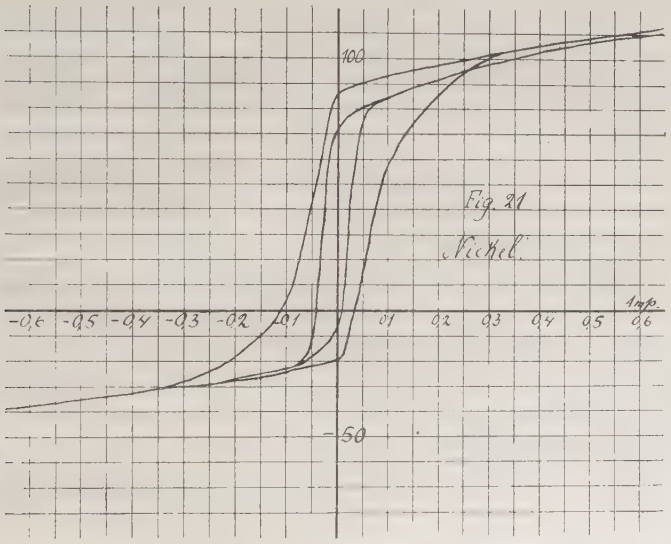
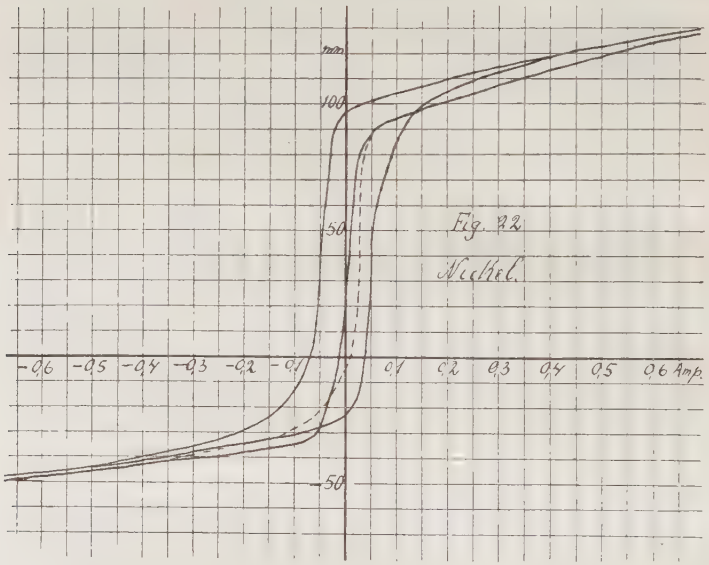


Fig. 21
Nickel

dass die Erscheinung völlig unabhängig vom Wesen der Erschütterung ist. Es ist danach also eine Eigenart des Nickels, dass es sein permanentes Moment nur langsam ändert, dass es aber, falls die die Abnahme des Moments verursachenden Kräfte nur lange genug dauern, keineswegs magnetisch hart ist. Vielleicht ist hiernach die völlige Entmagnetisierung des Nickels durch Ausglühen z. B. nur deshalb nicht möglich gewesen, weil die Dauer des Ausglühens zu kurz war.

Figur 19 a zeigt, bei welcher Stromstärke grössere Wirkungen zu erzielen sind, es müssen mehr als 5 Ampere durch den Versuchsdraht fliessen. Figur 21 ist bei 7 Ampere aufgenommen. Die Kurven zeigen eine sehr grosse Unsymmetrie gegen die Abszisse, die durch den schon vorhandenen remanenten Magnetismus hervorgerufen wurde, den der Draht vor dem Versuch besass. Das Inhaltsverhältnis ist 53 : 10. Die zugehörigen Versuchsreihen



sind in der Tabelle 9 mitgeteilt. Obgleich die Herstellung einer vollständig hysteresisfreien Kurve nicht möglich ist, so kommt man doch diesem Ziel bei Nickel bedeutend näher als bei Stahl, wo erst bei 9 Ampere ein Inhaltsverhältnis 26 : 10 erreicht wurde. Figur 22, die bei 13 Ampere entwickelt wurde, ist schon fast hysteresisfrei zu nennen. Reell ist nur der Inhalt des mittleren Teils, die äusseren Teile der Kurve fallen für Hin- und Rückgang

wahrscheinlich zusammen und die Abweichungen sind nur durch Ablesungsfehler infolge der Magnetometerstörungen entstanden.

Im folgenden soll noch ein Vergleich zwischen den Transversal-Erschütterungen des ersten und zweiten Abschnitts auf Eisen und Nickel gezogen werden. Wir haben gesehen, dass die mechanischen Transversal-Erschütterungen (die 2390 gr. $\frac{cm}{sek.}$ und 4900 gr. $\frac{cm}{sek.}$ Schläge) auf Eisen einen verhältnismässig geringen Einfluss besassen, während die Aenderungen bei Nickel verhältnismässig mässig gross waren. Nach den früheren Erörterungen hat dies die Bedeutung, dass die kritische Schlagstärke beim Eisen sehr hoch, bei Nickel niedriger gelegen ist. Im zweiten Abschnitt liegen die Verhältnisse fast umgekehrt. Vergleichen wir die Wechselstrom-Amperekurven von Eisen und Nickel miteinander, so sehen wir, dass bei Eisen die kritische Stromstärke sehr niedrig, ungefähr bei 2 Ampere, gelegen ist, während sie bei Nickel sehr hoch (bei 5 Ampere) liegt. Es war vorhin erwähnt, dass das Nickel Eigenschaften besitzt, die von der Art der Erschütterungen unabhängig sind. Hier dagegen sehen wir Erscheinungen auftreten, die nicht von der Art der Erschütterungen unabhängig sind, die vielmehr von der individuellen Eigenart der Erschütterungen zeugen.

Ergebnisse.

Nachdem die Ergebnisse meiner Untersuchungen im vorstehenden im einzelnen wiedergegeben sind, sei im folgenden noch eine kurze Wiedergabe der Resultate gegeben. Es war der Zweck dieser Arbeit, den Zusammenhang, der zwischen Stärke und Dauer von mechanischen und magnetischen Erschütterungen und Aenderung des magnetischen Moments von Eisen, Stahl und Nickel besteht, genauer zu ermitteln.

Es wurde daher im ersten Abschnitt der Einfluss von mechanischen Erschütterungen auf den Magnetismus der erwähnten ferromagnetischen Körper untersucht, wobei sich folgende Resultate ergaben:

Longitudinale Erschütterungen die durch Belastungsschwankungen hergestellt wurden, haben auf die longitudinale Magnetisierung nur temporäre Wirkung. Die Wirkung geht zurück, sobald die Erschütterungen aufhören.

Transversale Erschütterungen die durch Klopfen gegen den Draht erreicht wurden — das sämtliche Material wurde in Form von Drähten untersucht —, beeinflussen den Magnetismus aller 3 Körper in der Weise, dass sie die Hysteresisfläche zu verkleinern suchen. Quantitativ ist die Wirkung der Erschütterungen am ausgeprägtesten bei Nickel, bei Eisen verhältnismässig geringer, bei Stahl auch absolut sehr schwach. Bei allen Körpern wachsen die Aenderungen mit der Stärke der Erschütterungen, nach einem Gesetz, das sich für diese Erschütterungen nur mutmasslich hat aufstellen lassen. Das Umkippen der Molekularmagnete in die durch die Erschütterungen angewiesene Lage geschieht bei allen Körpern sehr schnell, innerhalb weniger Sekunden; eine Ausnahme macht nur der remanente Magnetismus des

Nickels. Hier erfolgt die Einstellung in die neue Lage erst nach mehreren Minuten (durchschnittliche Grenze ungefähr 10 Minuten). Im zweiten Abschnitt wurde der Einfluss **magnetischer Erschütterungen** behandelt. Die **longitudinalen Erschütterungen** wurden durch Stromschwankungen im Stromkreis der Magnetisierungsspule erzeugt. Wegen ihrer Kleinheit besassen sie auf das magnetische Moment keinen Einfluss. Die **transversalen Erschütterungen** wurden durch unterbrochene galvanische Gleichströme oder durch Wechselströme erzeugt, die durch den Versuchsdraht hindurchgesandt wurden. Die Wirkung der Erschütterungen wuchs mit ihrer Stärke. Bis zu einer gewissen Stärke der Erschütterungsströme war die Wirkung verhältnismässig gering, dann aber trat eine ausserordentliche Erhöhung der Wirkung ein. Die Stromstärke, bei der die erhöhte Wirkung eintrat, wurde die kritische Stromstärke genannt. Am ausgeprägtesten war sie bei Nickel, am wenigsten ausgeprägt bei Stahl. Es ist zu vermuten, dass für die mechanischen Erschütterungen ähnliche Beziehungen vorhanden sind, sie haben sich nur wegen der schwierigen Messung der Erschütterungskräfte dort nicht feststellen lassen. Die Wechselströme, die wechselnde zirkulare Wechselfelder im Versuchsdraht erzeugten, hatten beim Eisen eine so bedeutende Wirkung, dass sie, in genügender Stärke angewandt, den Inhalt der Hysteresiskurve zum Verschwinden brachten. Die Wechselfelder bewirken eine ausserordentliche Erhöhung der Permeabilität. Dies ist besonders für die jungfräuliche Kurve wichtig, die für kleine Felder schon sehr hohe Magnetisierungen anzeigt. Die Aenderung der Magnetisierung mit der Zeit erfolgt, wie im ersten Abschnitt, auch hier sehr rasch. Eine Ausnahme macht wiederum das permanente Moment des Nickels, das dieselbe Anomalie wie im ersten Abschnitt zeigt.

Tabellen

Tabelle 1.

Weiches Eisen. d = 1,8 mm.

1	2	3	4
W	Amp.	natürl. Kurve	Erschütt. Kurve
0	0,497	268	268
18	0,205	260	260
43,5	0,102	240	240
80	0,061	226	226
125	0,042	214	214
∞	0,000	191	191
125	— 0,042	138	138
80	— 0,061	11	10
43,5	— 0,102	— 150	— 151
18	— 0,205	— 256	— 258
0	— 0,497	— 318	— 318
18	— 0,205	— 289	— 288
43,5	— 0,102	— 256	— 255
80	— 0,061	— 240	— 240
125	— 0,042	— 226	— 226
∞	0,000	— 195	— 195
125	0,042	— 75	— 75
80	0,061	65	67
43,5	0,102	164	164
18	0,205	243	243
0	0,497	268	268

Tabelle 2.

Weiches Eisen. d = 1,8 mm.

1	2	3	4	5	6
W	Amp.	natürl. Kurve	Erschütt. Kurve	absolute Aender.	Aender. in % v. 3
0	0,559	370	370	0	0,00
18	0,232	348	345	3	0,86
43,5	0,115	318	315	3	0,94
80	0,069	299	293	6	2,00
125	0,037	283	280	3	1,00
∞	0,000	251	240	11	4,40
125	— 0,037	109	73	36	33,00
80	— 0,069	— 43	— 68	25	58
43,5	— 0,115	— 170	— 177	7	4,13
18	— 0,232	— 266	— 266	0	0,00
0	— 0,559	— 320	— 319	1	0,3
18	— 0,232	— 295	— 293	2	0,01
43,5	— 0,115	— 268	— 258	10	3,9
80	— 0,069	— 251	— 238	13	5,2
125	— 0,037	— 240	— 226	14	5,8
∞	0,000	— 209	— 196	13	6,25
125	0,037	— 134	— 109	25	17
80	0,069	12	38	26	216
43,5	0,115	202	215	13	6,5
18	0,232	314	315	1	0,3
0	0,559	370	370	0	0,0

Tabelle 3.

Stahl. d = 1,95 mm.

1	2	3	4	5	6
W	Amp.	natürl. Kurve	Erschütt. Kurve	absolute Aender.	Aender. in % v. 3
0	0,885	436	436	0	0
18	0,370	405	405	0	0
43,5	0,184	384	384	0	0
80	0,109	371	371	0	0
125	0,072	363	363	0	0
∞	0,000	345	342	3	0,87
125	— 0,072	316	312	4	1,4
80	— 0,109	294	289	5	1,7
43,5	— 0,184	180	168	12	6,7
18	— 0,370	— 210	— 210	0	0
0	— 0,885	— 278	— 278	0	0
18	— 0,370	— 253	— 252	1	0,4
43,5	— 0,184	— 235	— 235	0	0
80	— 0,109	— 223	— 225	2	0,8
125	— 0,072	— 217	— 216	1	0,5
∞	0,000	— 200	— 196	4	2,0
125	0,072	— 175	— 172	3	1,7
80	0,109	— 155	— 150	5	3,2
43,5	0,184	— 70	— 56	14	20
18	0,370	357	358	1	0,3
0	0,885	436	436	0	0

Tabelle 4.

Nickel. d = 1,45 mm.

1	2	3	4	5	6
W	Amp.	natürl. Kurve	Erschütt. Kurve	absolute Aender.	Aender. in % v. 3
0	0,722	51	51	0	0
18	0,306	36	35	1	2,8
43,5	0,152	28	23	5	17,8
80	0,090	25	—	—	—
125	0,060	24	19	5	20,8
∞	0,000	20	16	4	20,0
125	— 0,061	— 8	— 35	27	338
80	— 0,090	— 36	— 65	29	80,6
43,5	— 0,152	— 75	— 91	16	21,3
18	— 0,306	— 102	— 105	3	2,94
0	— 0,722	— 120	— 120	0	0
18	— 0,306	— 108	— 108	0	0
43,5	— 0,152	— 102	— 102	0	0
80	— 0,090	— 99	— 99	0	0
125	— 0,060	— 97	— 95	2	2,6
∞	0,000	— 92	— 89	3	3,26
125	0,061	— 72	— 60	12	16,6
80	0,090	— 63	— 25	38	60
43,5	0,152	— 2	9	11	550
18	0,306	32	34	2	6,25
0	0,722	51	51	0	0

Tabelle 5.

Weiches Eisen. d = 1,8 mm.

1	2	3	4
W	Amp.	natürl. Kurve	Erschütt. Kurve
0	0,497	297	297
18	0,205	216	216
43,5	0,102	182	181
80	0,061	161	160
125	0,042	148	146
∞	0,000	104	101
125	— 0,042	— 4	— 2
80	— 0,061	— 53	— 56
43,5	— 0,102	— 132	— 133
18	— 0,205	— 209	— 209
0	— 0,497	— 333	— 334
18	— 0,205	— 228	— 228
43,5	— 0,102	— 188	— 188
80	— 0,061	— 166	— 166
125	— 0,042	— 152	— 152
∞	0,000	— 103	— 102
125	0,042	1	4
80	0,061	57	58
43,5	0,102	131	131
18	0,205	198	199
0	0,497	298	297

Tabelle 6.

Weiches Eisen. d = 1,8 mm.

1	2	3	4	5	6
W	Amp.	natürl. Kurve	Erschütt. Kurve	absolute Aender.	Aender. in % v. 3
0	0,559	472	460	12	2,55
18	0,232	408	395	13	3,2
43,5	0,115	372	347	15	4,04
80	0,069	355	—	—	—
125	0,037	345	320	25	7,25
∞	0,000	315	20	295	94
125	— 0,037	115	— 80	195	170
80	— 0,069	— 97	— 105	8	8,25
43,5	— 0,115	— 181	— 133	48	26,5
18	— 0,232	— 260	— 177	83	31,9
0	— 0,559	— 330	— 233	97	29,4
18	— 0,232	— 290	— 182	92	31,7
43,5	— 0,115	— 257	— 130	127	49,5
80	— 0,069	— 242	— 105	137	56,7
125	— 0,037	— 233	— 80	153	65,7
∞	0,000	— 210	20	190	90,05
125	0,037	— 120	320	440	360
80	0,069	163	347	184	113
43,5	0,115	287	387	100	34,8
18	0,232	382	397	15	3,83
0	0,559	469	460	9	1,94

Tabelle 7.

Stahl. d = 1,95 mm.

1	2	3	4	5	6
W	Amp.	natürl. Kurve	Erschütt. Kurve	absolute Aender.	Aender. in % v. 3
0	0,885	213	213	0	0
18	0,370	181	181	0	0
43,5	0,184	155	155	0	0
80	0,109	142	142	0	0
125	0,072	134	130	4	2,98
∞	0,000	111	104	7	6,3
125	— 0,072	75	64	11	14,7
80	— 0,109	51	39	12	23,6
43,5	— 0,184	— 6	— 16	10	167
18	— 0,370	— 92	— 94	2	2,18
0	— 0,885	— 191	— 191	0	0
18	— 0,370	— 166	— 166	0	0
43,5	— 0,184	— 144	— 144	0	0
80	— 0,109	— 132	— 131	1	0,76
125	— 0,072	— 125	— 123	2	1,6
∞	0,000	— 103	— 101	2	1,94
125	0,072	— 68	— 52	16	23,5
80	0,109	— 46	— 28	18	39,2
43,5	0,184	12	26	14	116,5
18	0,370	104	106	2	1,94
0	0,885	213	213	0	0

Tabelle 8.

Stahl. d = 1,95 mm.

1	2	3	4	5	6
W	Amp.	natürl. Kurve	Erschütt. Kurve	absolute Aender.	Aender. in % v. 3
0	0,885	417	421	4	0,96
18	0,370	379	380	1	0,26
43,5	0,184	352	351	1	0,28
80	0,109	339	334	5	1,47
125	0,072	330	325	5	1,53
∞	0,000	311	301	10	3,22
125	— 0,072	283	268	15	5,3
80	— 0,109	265	241	24	9,05
43,5	— 0,184	181	53	128	70,7
18	— 0,370	— 319	— 348	29	91
0	— 0,885	— 398	— 402	4	1,01
18	— 0,370	— 370	— 372	2	0,54
43,5	— 0,184	— 348	— 348	0	0
80	— 0,109	— 335	—	—	—
125	— 0,072	— 329	— 330	1	0,34
∞	0,000	— 322	— 309	13	4,04
125	0,072	— 285	— 273	12	4,22
80	0,109	— 267	— 250	17	6,37
43,5	0,184	— 199	— 100	99	49,7
18	0,370	325	343	18	5,55
0	0,885	417	416	1	0,24

Tabelle 9.

Nickel. d = 1,45 mm.

1	2	3	4	5	6
W	Amp.	natürl. Kurve	Erschütt. Kurve	absolute Aender.	Aender. in % v. 3
0	0,750	114	112	2	1,75
18	0,310	102	98	4	3,92
43,5	0,152	95	88	7	7,38
80	0,092	92	84	8	8,7
125	0,060	90	82	8	8,9
∞	0,000	86	62	24	27,9
125	— 0,060	31	20	51	164,5
80	— 0,092	8	— 23	31	388
43,5	— 0,152	— 12	— 25	13	108
18	— 0,310	— 29	— 35	6	20,7
0	— 0,750	— 41	— 40	1	24,4
18	— 0,310	— 30	— 29	1	33,4
43,5	— 0,152	— 26	— 25	1	38,5
80	— 0,092	— 24	— 20	4	16,7
125	— 0,060	— 23	— 18	5	21,8
∞	0,000	— 20	— 10	10	50
125	0,060	25	80	55	220
80	0,092	52	87	35	67,4
43,5	0,152	77	—	—	—
18	0,310	109	103	6	5,5
0	0,750	114	109	5	4,39

Vorliegende Arbeit wurde im physikalischen Institut der grossherzogl. meckl. Landesuniversität Rostock angefertigt. Es ist mir eine angenehme Pflicht, meinem hochverehrten Lehrer, Herrn Prof. Heydweiller, für die Anregung der vorliegenden Arbeit und seine freundlichst gewährte Unterstützung meinen herzlichsten Dank auszusprechen.